



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## REGULACE TEPLOTY V BIOREACTORU

TEMPERATURE CONTROL IN BIOREACTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ZBYNĚK POSPÍCHAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BLAHA, Ph.D.

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav automatizace a měřicí techniky**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Kybernetika, automatizace a měření**

**Student:** Bc. Zbyněk Pospíchal

**ID:** 74910

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2010/2011

**NÁZEV TÉMATU:**

## Regulace teploty v bioreactoru

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Student navrhne regulační algoritmus termoregulátoru, vytvoří model v prostředí Matlab-Simulink, provede simulace modelu a na jejich základě navrhne optimalizaci modelu. S použitím takto optimalizovaného modelu naprogramuje řídicí algoritmus do řídicího systému bioreactoru. (dle modelu navrhne regulátor, který aplikuje do zařízení a uvede do plné funkčnosti) Funkčnost celého zařízení vyzkouší v praxi. V algoritmu bude použita fuzzy logika, která bude reagovat na okolní vlivy, které do celé soustavy výrazným způsobem vstupují a celý proces regulace ovlivňují.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Bobál, V., Böhm, J., Prokop, R., Fessl, J. Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů: algoritmy a implementace. Nakladatelství VUTIUM, Vysoké učení technické v Brně, 1999. ISBN 80-214-1299-2.
- [2] BLAHA, P, VAVŘIN, P.: Řízení a regulace I. Elektronické skriptum VUT v Brně.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 23.5.2011

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

**prof. Ing. Pavel Jura, CSc.**  
*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá možnostmi zlepšení kvality regulace teploty v bioreactoru. Byl vytvořen model systému. Klasický PI regulátor není schopen splnit podmínky regulace. Na základě analýzy systému byl zvolen jako nejvhodnější fuzzy regulátor. Nastavený fuzzy regulátor je porovnán s původně implementovaným PI regulátorem. Je dosaženo zlepšení odezvy ve všech sledovaných parametrech.

## **Klíčová slova**

photobioreactor, bioreactor, Peltierův článek, fuzzy regulátor

## **Abstract**

This thesis deal with improvement behavior of temperature control in bioreactor. It was created model of system. Basic PI controller could solve all problems. After analysis of system were decided to used fuzzy controller. Fuzzy controller in comparison with classic PI controller has better behavior in this application.

## **Keywords**

photobioreactor, bioreactor, Peltier cell, fuzzy controller

### **Bibliografická citace:**

POSPÍCHAL, Z. *Regulace teploty v bioreactoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 74s. Vedoucí diplomové práce byl doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Regulace teploty v bioreactoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji prezidentovi firmy PSI Ing. Martinu Trtílkovi za možnost realizovat tuto práci ve firmě a také děkuji Ing. Michalovi Šicnerovi za pomoc s realizací a cenné rady při tvorbě diplomové práce.

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Blahovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....  
podpis autora

# SYMBOLY A ZKRATKY

|               |  |  |
|---------------|--|--|
| $A_f$         | plocha chladiče pro vyzařování                         | [m <sup>2</sup> ]                      |
| $c_v$         | tepelná kapacita vody                                  | [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] |
| $c_{dno}$     | tepelná kapacita nerez                                 | [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] |
| $c_{air}$     | tepelná kapacita vzduchu                               | [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] |
| $c_{Cu}$      | tepelná kapacita mědi                                  | [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] |
| $c_{ch}$      | tepelná kapacita chladiče (hliník)                     | [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] |
| $e(k)$        | regulační odchylka v kroku $k$                         | [°C]                                   |
| $\Delta e(k)$ | diference regulační odchylky v kroku $k$               | [°C.s <sup>-1</sup> ]                  |
| $K$           | zesílení   | [-]                                    |
| $I$           | napájecí proud pel. článku                             | [A]                                    |
| $I_{MAX}$     | maximální napájecí proud                               | [A]                                    |
| $k$           | tepelná vodivost peltierova článku                     | [W.K <sup>-1</sup> ]                   |
| $k_{vk}$      | součinitel přestupu tepla voda-dno                     | [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]  |
| $k_{okoli}$   | součinitel přestupu tepla do okolí                     | [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]  |
| $k_{kk}$      | součinitel přestupu tepla vodič-dno                    | [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]  |
| $m_{ch}$      | hmotnost chladiče                                      | [kg]                                   |
| $M$           | měřítka  | [-]                                    |
| $Q_H$         | tepelný tok z teplé strany peltieru                    | [W]                                    |
| $Q_C$         | tepelný tok ze studené strany peltieru                 | [W]                                    |
| $Q_H$         | tepelný tok z teplé strany peltieru                    | [W]                                    |
| $Q_j$         | joulovo teplo  | [W]                                    |
| $Q_K$         | tepelný tok způsobený teplotním gradientem pel. článku | [W]                                    |
| $Q_{MAX}$     | maximální odebíraný tepelný výkon                      | [W]                                    |
| $R$           | elektrický odpor peltierova článku                     | [Ω]                                    |
| $R_t$         | tepelný odpor chladiče                                 | [K.W <sup>-1</sup> ]                   |
| $S_{kv}$      | plocha dna v kontaktu s vodou                          | [m <sup>2</sup> ]                      |
| $S_{sp}$      | plocha skla  | [m <sup>2</sup> ]                      |
| $S_{dno}$     | plocha dna   | [m <sup>2</sup> ]                      |
| $S_{okoli}$   | celková plocha vyzařování do okolí                     | [m <sup>2</sup> ]                      |
| $S_{Cu}$      | plocha vodiče  | [m <sup>2</sup> ]                      |
| $T_{voda}$    | teplota vody   | [K]                                    |
| $T_{okoli}$   | teplota okolí  | [K]                                    |
| $T_H$         | teplota teplé strany peltieru                          | [K]                                    |
| $T_C$         | teplota studené strany peltieru                        | [K]                                    |
| $T_{vk}$      | teplota dna na styku s vodou                           | [K]                                    |
| $T_{kk}$      | teplota dna na styku s vodičem                         | [K]                                    |
| $T_{v1}$      | teplota strany vodiče na styku se dnem                 | [K]                                    |
| $T_{v2}$      | teplota strany vodiče na styku s peltierem             | [K]                                    |

|                 |                                     |                                       |
|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| $T_{in}$        | teplota uvnitř bioreactoru          | [K]                                   |
| $T_{ch}$        | teplota chladiče                    | [K]                                   |
| $T_I$           | integrační konstanta                | [s]                                   |
| $T_D$           | derivační konstanta                 | [s]                                   |
| $T_t$           | konstanta sledování                 | [s]                                   |
| $T_s$           | perioda vzorkování                  | [s]                                   |
| $\Delta T$      | rozdíl teplot                       | [K]                                   |
| $u(k)$          | akční zásah v kroku $k$             | [-]                                   |
| $\Delta u(k)$   | diference akčního zásah v kroku $k$ | [-]                                   |
| $V_v$           | objem vody                          | [m <sup>3</sup> ]                     |
| $V_{Cu}$        | objem vodiče                        | [m <sup>3</sup> ]                     |
| $V_{dno}$       | objem materiálu dna                 | [m <sup>3</sup> ]                     |
| $V_{air}$       | objem vzduchu v bioreactoru         | [m <sup>3</sup> ]                     |
| $V_{MAX}$       | maximální napájecí napětí           | [V]                                   |
| $w(k)$          | žádaná hodnota v kroku $k$          | [°C]                                  |
| $y(k)$          | výstup v kroku $k$                  | [°C]                                  |
| $\alpha$        | seebecův koeficient                 | [V.K <sup>-1</sup> ]                  |
| $\delta_{dno}$  | tloušťka dna                        | [m]                                   |
| $\delta_{dno}$  | tloušťka vodiče                     | [m]                                   |
| $\lambda_{dno}$ | měrná tepelná vodivost nerez        | [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] |
| $\lambda_{Cu}$  | měrná tepelná vodivost mědi         | [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] |
| $\mu$           | funkce příslušnosti                 | [-]                                   |
| $\rho_v$        | hustota vody                        | [kg.m <sup>3</sup> ]                  |
| $\rho_v$        | hustota nerez                       | [kg.m <sup>3</sup> ]                  |
| $\rho_{air}$    | hustota vzduch                      | [kg.m <sup>3</sup> ]                  |
| $\rho_{Cu}$     | hustota měď                         | [kg.m <sup>3</sup> ]                  |



## OBSAH

|  |    |
|--|----|
| Symboly a zkratky.....                                   | 1  |
| 1 Úvod.....  | 7  |
| 2 Photobioreactor.....                                   | 9  |
| 3 Vstupně výstupní popis systému.....                    | 11 |
| 4 Peltierův článek.....                                  | 14 |
| 4.1 Model peltierova článku.....                         | 15 |
| 4.2 Použitý typ článku.....                              | 17 |
| 4.3 Napájení článku.....                                 | 19 |
| 5 Model bioreactoru.....                                 | 20 |
| 5.1 Nádoba.....  | 21 |
| 5.2 Tělo bioreactoru.....                                | 24 |
| 5.3 Vodič tepla.....                                     | 25 |
| 5.4 Chladič .....  | 27 |
| 5.5 Měřicí sonda.....                                    | 28 |
| 6 Matlab - simulink.....                                 | 29 |
| 7 Identifikace.....                                      | 31 |
| 7.1 Sběr dat .....                                       | 31 |
| 7.2 Identifikace skokem teploty.....                     | 32 |
| 7.3 Srovnání výsledků simulace s měřenými průběhy.....   | 34 |
| 7.4 Rozbor poznatků získaných z identifikace.....        | 36 |
| 8 Ověření dynamických vlastností peltierova článku.....  | 37 |
| 8.1 Přípravek pro testování .....                        | 37 |
| 8.1.1 Model tepelné soustavy.....                        | 38 |
| 8.1.2 Thermo peltier driving.....                        | 39 |
| 8.1.3 Snímače teploty .....                              | 39 |
| 8.1.4 PLC Omron.....                                     | 39 |
| 8.1.5 Programové vybavení.....                           | 39 |
| 8.2 Výsledky experimentu.....                            | 40 |
| 8.3 Zhodnocení výsledků experimentu.....                 | 42 |
| 9 Volba regulátoru.....                                  | 45 |
| 9.1 Regulátor pracující s modelem soustavy.....          | 45 |
| 9.1.1 Regulátor s inverzním přenosem .....               | 45 |
| 9.1.2 Stavový regulátor se stavovým rekonstruktorem..... | 46 |
| 9.2 Regulátor se změnou parametrů.....                   | 46 |
| 9.2.1 Gain scheduling.....                               | 46 |
| 9.2.2 Adaptivní regulátor.....                           | 46 |

|   |    |
|---|----|
| 9.2.3 Fuzzy regulace.....                   | 47 |
| 9.3 Zvolený regulátor .....                 | 47 |
| 10 Regulátor .....                          | 48 |
| 10.1 Struktura regulátorů.....              | 48 |
| 10.1.1 Fuzzy PI.....                        | 50 |
| 10.1.2 Fuzzy PI+PD regulátor .....          | 51 |
| 10.1.3 Klasický PS regulátor .....          | 52 |
| 10.2 Nastavení regulátorů.....              | 53 |
| 11 Simulační schéma.....                    | 54 |
| 12 Srovnání výsledků .....                  | 56 |
| 12.1 Přejchodové děje pro různé výkony..... | 56 |
| 12.2 Odezva na působící poruchu.....        | 58 |
| 12.2.1 Kompenzace poruchy.....              | 59 |
| 12.3 Zhodnocení regulátorů.....             | 64 |
| 13 Implementace do jednočipu.....           | 65 |
| 14 Závěr.....                               | 68 |
| SEZNAM PŘÍLOH.....                          | 73 |

## Seznam Obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1: Photobioreactor.....  | 9  |
| Obrázek 2: Blokové schéma systému.....   | 11 |
| Obrázek 3: Peltierův článek.....   | 14 |
| Obrázek 4: Zobrazení struktury peltierova článku .....   | 15 |
| Obrázek 5: Peltierův článek směr šíření tepla při průchodu proudem.....  | 16 |
| Obrázek 6: Rozmístění dvou peltierů na chladiči, pohled shora.....   | 18 |
| Obrázek 7: Schéma zapojení napájecího H-můstku.....  | 19 |
| Obrázek 8: Návrh konstrukce bioreactoru, pohled zepředu s rozměry a teplotami modelu.....  | 21 |
| Obrázek 9: Tepelné toky v nádobě.....  | 23 |
| Obrázek 10: Bioreactor pohled zhora.....   | 25 |
| Obrázek 11: Vodič tepla od peltieru.....   | 26 |
| Obrázek 12: chladič.....   | 27 |
| Obrázek 13: Simulační schéma v Simulinku.....  | 30 |
| Obrázek 14: Průběh teploty chladiče při nalití horké vody a postupné chládnutí, s nulovým výkonem, zelená: průběh simulace, modrá: měřená data ..... | 33 |
| Obrázek 15: Průběh chládnutí vody v nádrži po nalití horké vody, zelená: průběh simulace, modrá: měřená data. Nulový výkon.....                      | 33 |
| Obrázek 16: Průběh teploty vody a chladiče, změřená data a simulace. ....  | 34 |
| Obrázek 17: Průběh teploty při výkonu 30 %, změřená data a simulace.....   | 35 |
| Obrázek 18: Průběh teploty vody a chladiče při výkonech 50 a 70%, změřená data a simulace. ....  | 35 |
| Obrázek 19: Testovací sestava.....   | 38 |
| Obrázek 20: Peltier mezi bloky kovu.....   | 38 |
| Obrázek 21: Průběh teploty peltierova článku při různých periodách PWM. Zobrazeny teploty na teplé i studené straně. ....                            | 41 |
| Obrázek 22: Průběh teplot peltierova článku pro různé frekvence PWM, teplota teplé i chladné strany.....   | 42 |
| Obrázek 23: Srovnání průběhu tepelného výkonu při napájení spojitým proudem a PWM.....   | 43 |
| Obrázek 24: Rozložení funkce příslušnosti pro vstup $e(k)$ i $\Delta e(k)$ .....   | 49 |
| Obrázek 25: Grafické prostředí fuzzy toolboxu pro nastavení fuzzy regulátoru.....  | 50 |
| Obrázek 26: Struktura fuzzy PI regulátoru.....   | 51 |
| Obrázek 27: Struktura fuzzy PI+PD regulátoru.....  | 52 |
| Obrázek 28: Struktura PS regulátoru.....   | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 29: Simulační schéma pro testování regulátorů.....   | 54 |
| Obrázek 30: Přechodové charakteristiky regulátorů pro žádanou hodnotu 30 °C .....                                      | 56 |
| Obrázek 31: Přechodové charakteristiky regulátorů pro žádanou hodnotu 50 °C.....                                       | 57 |
| Obrázek 32: Přechodové charakteristiky a akční zásahy regulátorů při žádané hodnotě teploty 50 °C.....                 | 58 |
| Obrázek 33: Odezva regulátorů při působení poruchy zapnutí světla na 100 % výkonu při žádané hodnotě 35 °C.....        | 59 |
| Obrázek 34: Implementace korekčního členu pro kompenzaci poruchy v regulačním schématu .....                           | 60 |
| Obrázek 35: Srovnání odezvy na poruchu s korekčním členem a bez při regulaci PS regulátorem, žádaná hodnota 35 °C..... | 62 |
| Obrázek 36: Vliv korekčního členu s fuzzy PI regulátorem, žádaná teplota 35 °C.....                                    | 63 |
| Obrázek 37: Vliv změny teploty okolí na průběh regulace, žádaná teplota 35 °C.....                                     | 63 |

# 1 ÚVOD

Pro potřeby biologických laboratoří bylo vyvinuto zařízení photobioreactor. Toto zařízení slouží k pěstování mikroorganismů. Určité druhy pěstovaných řas mají široké využití. Jednou z aplikací je využití zelených řas k odbourávání oxidu uhličitého, který vzniká při spalování fosilních paliv při výrobě elektřiny. Dále je možné využít různé druhy k získání léčebných látek nebo jako náhradu ropy. Jednotlivé pěstované druhy mají specifické požadavky na prostředí, ve kterém je jejich růst optimální. Pro zkoumání vlivu prostředí na organismy byl vyvinut photobioreactor. Toto zařízení umožňuje definovat řadu parametrů, jako je teplota, druh a intenzita osvětlení, přítomnost plynů a živných látek. Vzorky jsou pěstovány ve vodném prostředí. Photobioreactory jsou vyráběny v širokém rozsahu objemů.

Jedním z klíčových faktorů, který ovlivňuje růst je teplota. Kultivované organismy jsou velice citlivé na teplotu. Překročení požadované teploty o několik málo stupňů může způsobit úhyn vzorku. Biologové definují přísné požadavky na regulaci teploty. Nulový překmit, udržování konstantní teploty s přesností na desetinu stupně, invariantnost vůči poruchám a minimalizace doby přechodného děje.

Tyto požadavky není jednoduché dodržet. Pro regulaci teploty je využit peltierův článek, který umožňuje topit i chladit. Nevýhodou je jeho nelineární charakteristika. Peltierův článek se uplatňuje v řadě aplikací, kde je potřeba přesně regulovat teplotu. Nejčastěji slouží k chlazení citlivých elektronických zařízení jako jsou laserové diody. Použití článku pro ohřev takto masivní soustavy v širokém spektru teplot, jako je bioreactor je neobvyklé a v praxi málo využívané. Je jen velice málo zdrojů, které se zabývají touto tematikou.

V současné době pracuje v zařízení PI regulátor, který má pouze informaci o teplotě vody. Regulátor je velice tlumený, aby nedošlo k překmitu. Výsledkem je dlouhá doba regulace a špatná odezva na poruchu. Nastavení proběhlo velice intuitivně bez předchozí hlubší analýzy systému a nesplňuje většinu požadavků kladených na regulaci teploty.

Účelem této práce je zlepšit chování regulátoru ve všech sledovaných parametrech bez změn na konstrukci zařízení. Pouhou změnou softwaru řídicího mikrokontroleru. Pro postihnutí všech poruch a pro přesnou informaci o výkonu peltierova článku by bylo potřeba implementovat do zařízení víc čidel teploty na různých místech. Tato úprava by si vyžádala velký zásah do konstrukce zařízení a není žádoucí.

Na začátku je potřeba vytvořit model systému. Pro modelování byl použit MATLAB – Simulink. Na základě fyzikálního popisu a změřených průběhů systému v různých režimech je potřeba nastavit model tak aby co nejvěrněji odpovídal chování reálného zařízení. Tento model následně poslouží k odladění vhodného regulátoru. Regulované děje jsou velice pomalé a photobioreactor sám obsahuje jen jedno čidlo pro měření teploty, což neposkytuje dostatečnou informaci o chování systému. Model se může

využít ke sledování více parametrů a umožňuje přesně definovat poruchy, které do systému vstupují. Provedení simulace je nesrovnatelně rychlejší než stejný experiment na reálném zařízení, tím se velice zkrátí doba potřebná pro ladění regulátoru.

Z analýzy současného nastavení vyplývá, že není možné naladit jednoduchý PI regulátor, tak aby splňoval všechny požadavky regulace. Je potřeba zvolit jiný typ regulátoru, který bude schopen postihnout nelinearity soustavy. V zadání je požadavek na použití fuzzy regulátoru. Po hlubší analýze systému se zdá být tento typ regulátoru optimální. Popis systému obsahuje řadu neurčitostí což plně vystihuje filozofii fuzzy logiky. Vágnost pojmů a nelineární regulační plocha může být řešením většiny problémů, které se v regulaci teploty bioreactoru vyskytují.

Poslední částí je zvolit vhodný typ regulátoru a provést optimální nastavení. Oproti klasickému regulátoru je nastavení složitější a následná implementace do mikrokontroleru bude náročnější na výkon a paměť. Nevýhody jsou mnohonásobně vykompenzovány zlepšením kvality regulace.

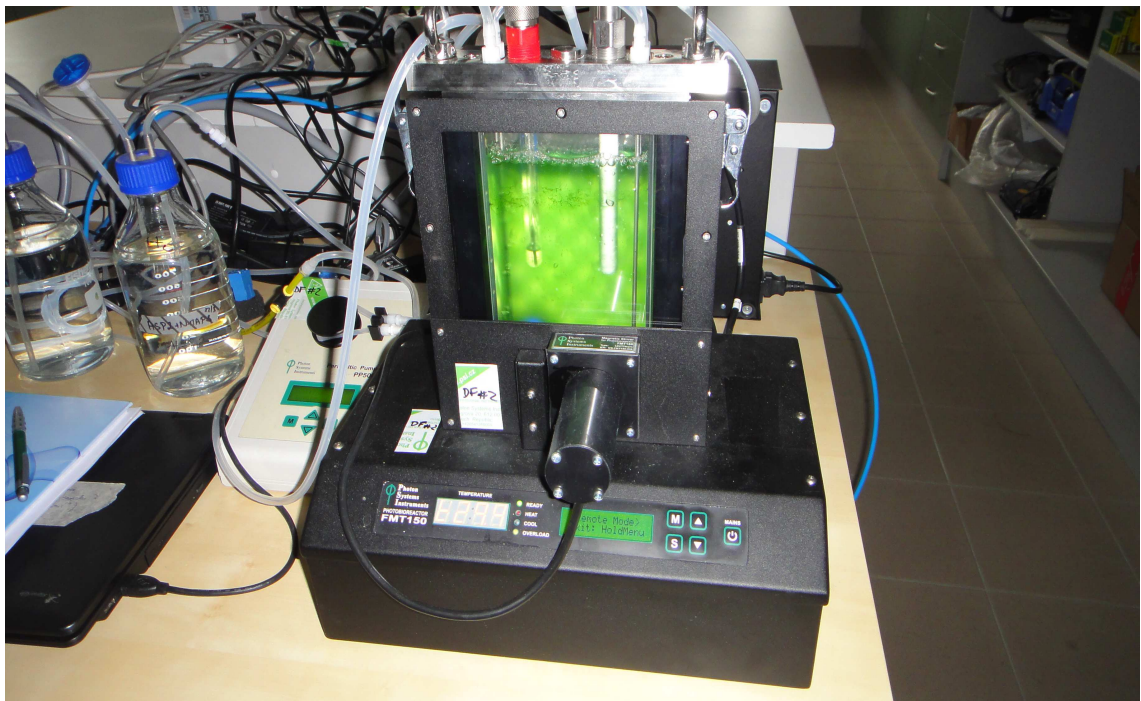
## 2 PHOTOBIOREACTOR

Zařízení photobioreactor bylo vyvinuto firmou Photo System Instrumens sídlící v Brně. Slouží k pěstování mikroorganismů za definovaných podmínek. Je vyráběno v objemech 0,4 až 100 l.

Bioreactor umožňuje definovat tepelné podmínky s přesností na desetinu stupně. Dále je možné volit druh a intenzita světla. Z externího zdroje lze do kultivovaného vzorku dodávat směs plynů o definovaném objemu a složení. Roztok je míchán probubláváním plynu, nebo lze použít magnetickou míchačku. Pro výživu pěstovaných organismů jsou do roztoku přidávány živiny, pumpování malého objemu živného roztoku zajišťuje externí peristaltická pumpa.

Zařízení měří teplotu a fluorescenční parametry vzorku. Podle použité sondy lze dále měřit pH, koncentraci  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ .

Biologové, kteří se zařízením pracují definují další omezující podmínky na regulaci. Dosažení žádané hodnoty bez překmitu a v co nejkratším čase. Sledování žádané hodnoty s odchylkou menší jak  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Invariantnost vůči všem poruchám. Překročení žádané hodnoty může mít za následek likvidaci pěstovaných organismů. Tato podmínka je zásadní pro celý návrh regulátoru.



Obrázek 1: Photobioreactor

Firma PSI s. r. o. se zabývá vývojem a výrobou zařízení pro měření v biologii. Mimo technickou část má i vlastní laboratoř pro vývoj metod pro pěstování biologických vzorků. Kromě mikrobiologie vyvíjí i měřicí aparatury pro měření rostlin například zařízení pro měření fluorescenčních parametrů rostlin. Automatické systémy pro pěstování za definovaných podmínek s vysokou přesností nastavení. 95 % výrobků se exportuje do zahraničí. Směr vývoje nových produktů je velice ovlivněn požadavky zákazníků a tak vznikají komplexní automatické stroje s implementovanou měřicí aparaturou pro výzkumné ústavy a univerzity po celém světě.

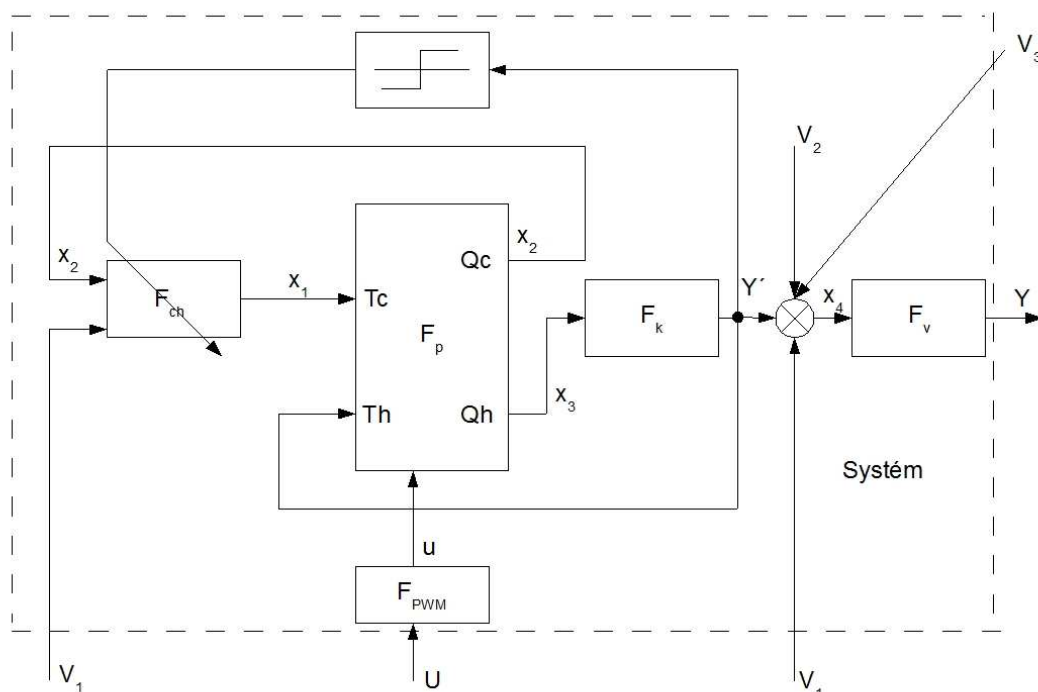
#### Kontakt:

Photon Systems Instruments  
Drásov 470  
664 24 Drásov  
Tel: +420 511 440 011 | Fax: +420 511 440 901  
[www.psi.cz](http://www.psi.cz)



### 3 VSTUPNĚ VÝSTUPNÍ POPIS SYSTÉMU

Z regulačního hlediska je zařízení bioreactoru mnohazměrný nelineární systém na který působí množství měřitelných i neměřitelných poruch. Jedinou informací o chování systému poskytuje měření teploty vody v nádobě. Akční veličinou je střída PWM napájecího proudu a jeho polarita. Měřitelnou poruchu představuje světelný panel tvořený maticí LED diod, které produkují parazitní teplo. Neměřitelnou poruchou je teplota okolí a teplota plynu, který probublává nádobou. Dále systém ovlivňuje sepnutí ventilátoru na chladiči. Je znám moment sepnutí. Sepnutý ventilátor výrazně mění parametr soustavy.



Obrázek 2: Blokové schéma systému

Na obrázku 2 je zobrazeno blokové schéma systému.

Význam jednotlivých bloků:

$F_v$  – přenos subsystému voda-nádrž, charakter setrvačný článek

$F_k$  – přenos subsystému kovový vodič tepla od peltierova článku, setrvačný článek

- $F_p$  – statický přenos peltierova článku, vzhledem k velikosti ostatních časových konstant je dynamika zanedbatelná
- $F_{ch}$  – přenos chladiče, setrvačný článek, sepnutím ventilátoru se mění parametry soustavy, mění se tepelný odpor

#### Vstupně výstupní veličiny:

- $U$  – akční zásah, střída PWM signálu v procentech
- $Y$  – výstup systému, teplota vody v nádrži

#### Poruchové veličiny:

- $V_1$  – teplota okolí, vstupuje na dvou místech do soustavy, není měřitelná
- $V_2$  – vliv zapnutí světla, z identifikace je znám její přenos a velikost, působí v soustavě
- $V_3$  – teplota plynů, neměřitelná porucha

#### Vnitřní veličiny:

- $u$  – napájecí proud, znaménko akčního zásahu řídí polaritu, jde o PWM signál s periodou 50 ms a střídou danou hodnotou akčního zásahu
- $x_1, x_2, x_3, x_4$  – tepelné toky uvnitř systému

Ze schématu vyplývá řada problémů. Většina poruchových veličin je neměřitelná a působí uvnitř soustavy. Výkon peltierova článku je závislý na velikosti napájecího proudu a na teplotách obou stran. Sepnutím ventilátoru se skokem mění tepelný odpor chladiče. Změnou tepelného odporu se mění přenos soustavy.

Soustava jako celek má charakter sériového řazení setrvačných článků s dominantní časovou konstantou v řádu desítek minut.

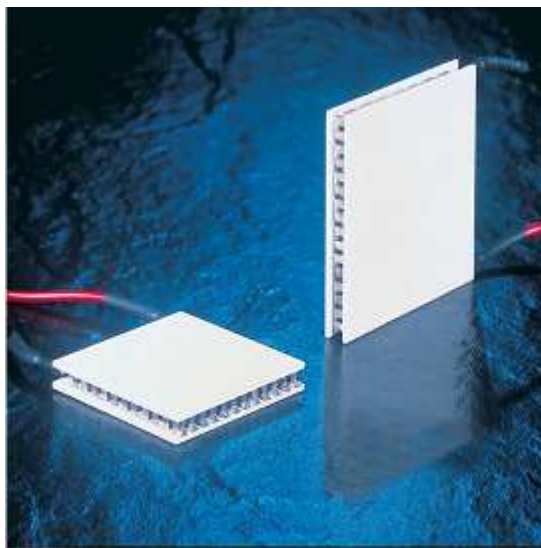
Na základě identifikace „Black box“ bylo zjištěno, stejně jako v literatuře, že pro různé výkonové úrovně se mění parametry identifikované soustavy. Nelze nalézt jednoduchý lineární model, který by vyhovoval popisu systému v celém rozsahu výkonu 0 až 100 %. Změnou polarity proudu se mění charakter výkonu topení/chlazení. Přenos se v tomto případě mění velice výrazně. Výkon při topení a chlazení není stejný a nelze jej popsat stejnými přenosy.

Na základě zjištěných skutečností bylo nutné přistoupit k bližšímu popisu systému za účelem vytvoření univerzálního modelu, který bude schopen modelovat chování

systemu v celém rozsahu výkonu. Je třeba vytvořit model soustavy na základě popisu diferenciálními rovnicemi, ve kterých je možno zahrnout nelinearity a proměnné parametry.

## 4 PELTIERŮV ČLÁNEK

Jedním z řešení jak zajistit akční člen schopný topení i chlazení s vysokou přesností regulace je použití peltierova článku. Peltierův efekt je znám od poloviny 19. století. Teprve s rozvojem polovodičových materiálů však došlo k rozšíření zařízení využívajících tohoto efektu. V současné době jsou peltierovy články vyráběny v širokém rozsahu výkonů a provedení.



*Obrázek 3: Peltierův článek*

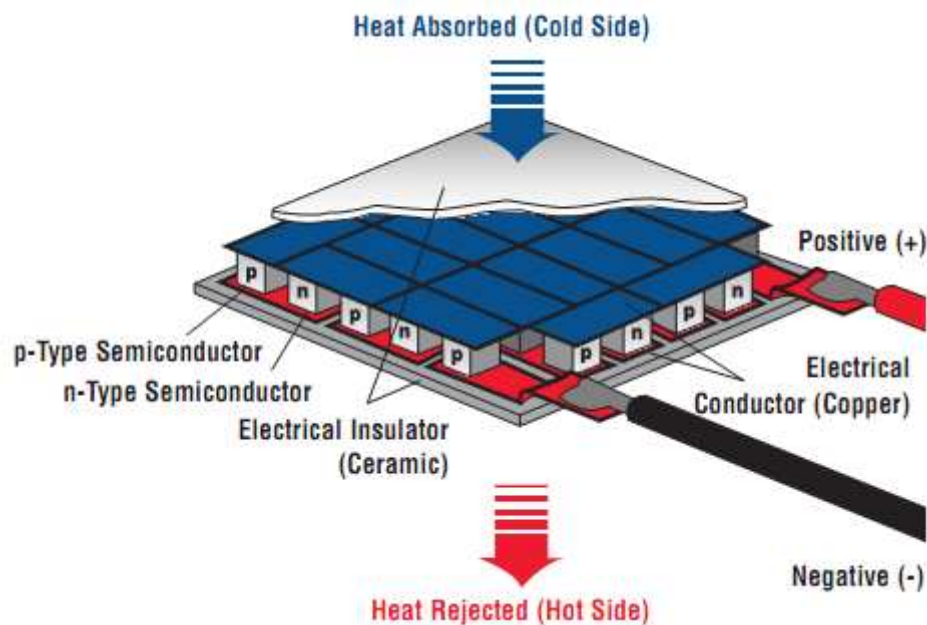
*zdroj: Melcor thermal solutions [online]. datasheet . [cit. 2010-08-25]  
<[www.melcor.com](http://www.melcor.com)>*

Peltierův jev vzniká na rozhraní dvou materiálů s různou výstupní prací elektronů. Termo článek je tvořen množstvím párů p-n dotovaných polovodičů spojených v sérii vetknutých a napájených mezi dvě keramické základové desky.

Při aplikaci stejnosměrného proudu dochází k přenosu tepla z chladné strany, kde je teplo absorbováno, na teplou stranu, kde je vyzařováno. Tento tepelný tok působí proti přirozenému teplotnímu gradientu, kdy teplo prostupuje z míst s vyšší teplotou do míst chladnějších. Neprotéká-li článkem proud změní se směr toku zpět do přirozeného směru.

Peltierův článek je zařízení schopné chladit i topit. Oproti jiným druhům zařízení pro řízení teploty se vyznačuje mnoha výhodami. Neobsahuje žádné pohyblivé komponenty a má tedy dlouhou životnost. Podle polarity napájecího proudu umožňuje chladit nebo topit. Napájen je stejnosměrným proudem. Nevýhodou je vysoká spotřeba energie a malá účinnost, která s rozdílem teploty klesá. Poměr topící/chladící výkon je

1,5 až 2,5. Topení je efektivnější. Závislost výkonu na velikosti napájecího proudu je nelineární.

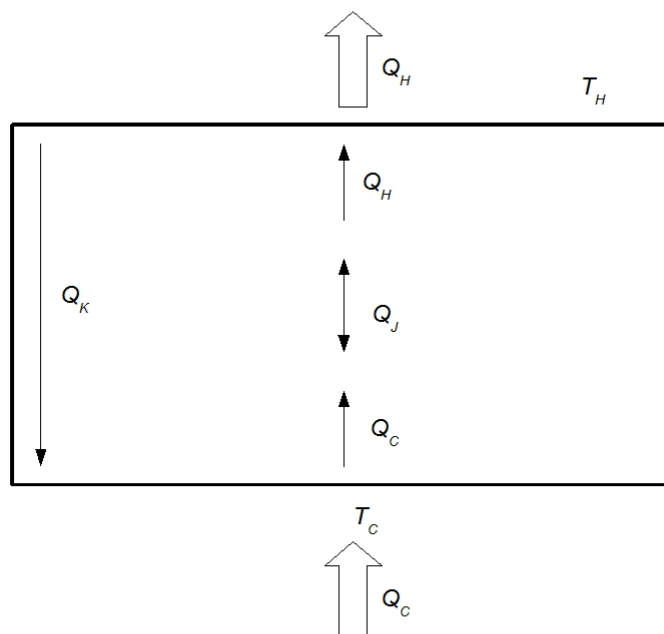


Obrázek 4: Zobrazení struktury peltierova článku

zdroj: Melcor thermal solutions [online]. datasheet . [cit. 2010-08-25]  
<[www.melcor.com](http://www.melcor.com)>

## 4.1 Model peltierova článku

Model článku popisuje tepelný tok na chladné, teplé straně a parazitní tepelný tok procházející z teplé do studené strany vzniklý nezanedbatelnou tepelnou vodivostí polovodičového materiálu. Dynamika článku je vzhledem k dynamice zbytku soustavy zanedbatelná. V modelu je použit pouze statický model popsáný dvojicí rovnic. Vstupem je proud  $I$ , teplota teplé strany  $T_H$  a teplota studené strany  $T_C$ . Výstupem je tepelný tok vystupující z teplé strany  $Q_H$  a tepelný tok absorbovaný na studené straně  $Q_C$ .



Obrázek 5: Peltierův článek směr šíření tepla při průchodu proudu

Na studené straně je absorbováno teplo  $Q_C$ . Chladicí výkon je dán rovnicí

$$Q_C = \alpha \cdot I \cdot T_C - \frac{1}{2} R \cdot I^2 - k \cdot \Delta T \quad (1)$$

Absorbované teplo na studené straně je transportováno a spolu s joulovým teplem vzniklým průchodem proudu je vyzařováno na teplé straně  $Q_H$ . Tepelný výkon je dán rovnicí

$$Q_H = \alpha \cdot I \cdot T_H + \frac{1}{2} R \cdot I^2 - k \cdot \Delta T \quad (2)$$

$\Delta T = T_H - T_C$  - rozdíl teplot na teplé a studené straně

Výkon peltierova článku je závislý na materiálu a je úměrný seebekovu koeficientu  $\alpha$  [ $\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ ], procházejícímu proudu  $I$  a teplotě. Procházející proud generuje joulovo teplo  $Q_J$ , které snižuje chladicí výkon článku. Teplotní gradient článku způsobuje přenos tepla z teplé na studenou stranu. Tepelná vodivost článku je určena parametrem  $k$  [ $\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$ ]. Parametry  $\alpha$ ,  $R$  a  $k$  jsou mírně teplotně závislé. Dají se určit teoretickým výpočtem

nebo měřením. Výrobce obvykle poskytuje jenom některé parametry. V literatuře [17] jsou popsány rovnice pro určení parametrů článku z informací, které jsou běžně dostupné v datasheetu výrobce.

Experimentem byla ověřena závislost parametrů na teplotě. Seebeckův koeficient je závislý na rozdílu teplot a je modelován lineární závislostí. Elektrický odpor má charakter ohmického odporu kovového vodiče, z měření vyplývá téměř lineární nárůst s teplotou. O tyto teplotní závislosti jsou rozšířeny vztahy (1) a (2).

$$Q_H = (|\Delta T| \cdot s_x + s_k) \cdot I \cdot T_H + \frac{1}{2} (T_H \cdot r_x + r_k) \cdot I^2 - k \cdot \Delta T \quad (3)$$

$$Q_C = (|\Delta T| \cdot s_x + s_k) \cdot I \cdot T_C - \frac{1}{2} (T_H \cdot r_x + r_k) \cdot I^2 - k \cdot \Delta T \quad (4)$$

$s_x, s_k$  - parametry lineární funkce závislosti seebeckova koeficientu na  $\Delta T$   
 $r_x, r_k$  - parametry lineární funkce závislosti odporu vodičů na  $T_H$

Pro modelování systému bioreactoru není teplotní závislost významná a postačuje uvažovat parametry za konstantní. V modelu jsou použity rovnice (1) a (2).

## 4.2 Použitý typ článku

V aplikaci jsou použity dva paralelně řazené články typ:

Melcor THERMATEC™ SERIES HT8-12-40

tato řada se vyznačuje vysokým rozsahem pracovních teplot až do 225 °C.

Parametry z datasheetu udává Tabulka 4.1.

**Tabulka 4.1 Parametry pel. článku z datasheetu**

|                                 |       |      |           |
|---------------------------------|-------|------|-----------|
| teplota teplé strany $T_C$ [°C] | 25    | 50   | 125       |
| $Q_{MAX}$ [W]                   | 72    | 82   | 88        |
| $\Delta T$ [°C]                 | 67    | 74   | 89        |
| $I_{MAX}$ [A]                   | 8,5   | 8,45 | 8,3       |
| $V_{MAX}$ [V]                   | 14,4  | 16,1 | 20,5      |
| $R$ [ $\Omega$ ]                | 1,488 | 1,7  | neuvedeno |

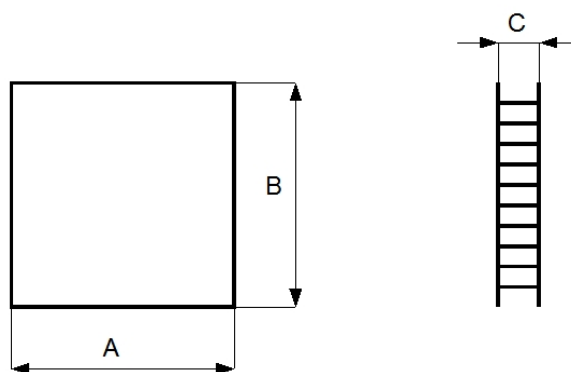
zdroj: Melcor thermal solutions [online]. datasheet . [cit. 2010-08-25] <www.melcor.com>

Rozměry jednoho článku

$A = 40 \text{ mm}$

$B = 40 \text{ mm}$

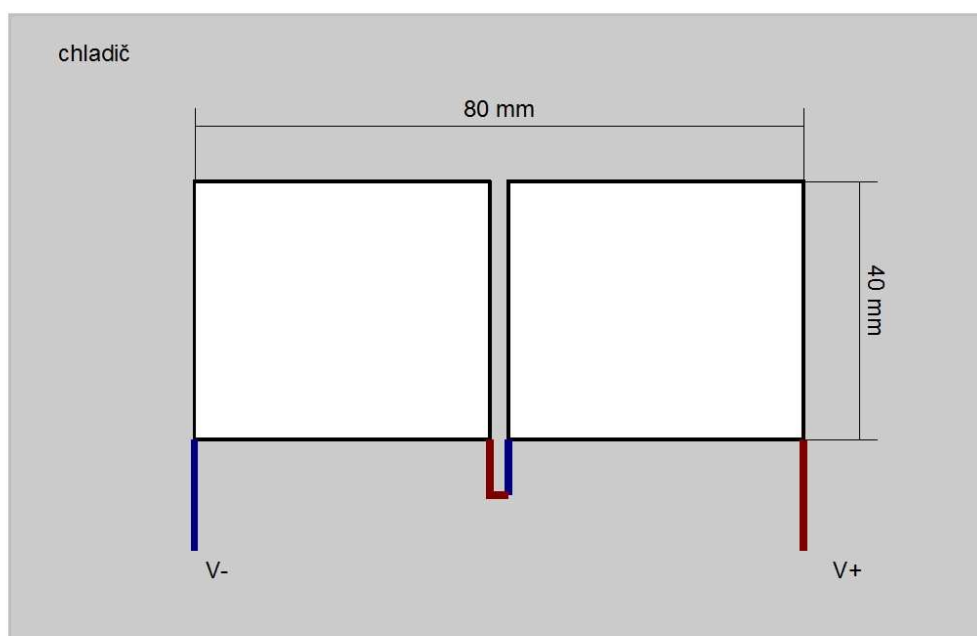
$C = 3,3 \text{ mm}$



Měřením parametrů byly zjištěny hodnoty uvedené v Tabulce 5.2

**Tabulka 4.2: parametry peltierova článku z měření**

| $S_x$     | $S_k$     | $r_x$     | $r_k$    | $k$   |
|-----------|-----------|-----------|----------|-------|
| $8.35e-5$ | $3.69e-2$ | $0.00461$ | $0.3875$ | $0.7$ |



*Obrázek 6: Rozmístění dvou peltierů na chladiči, pohled shora*



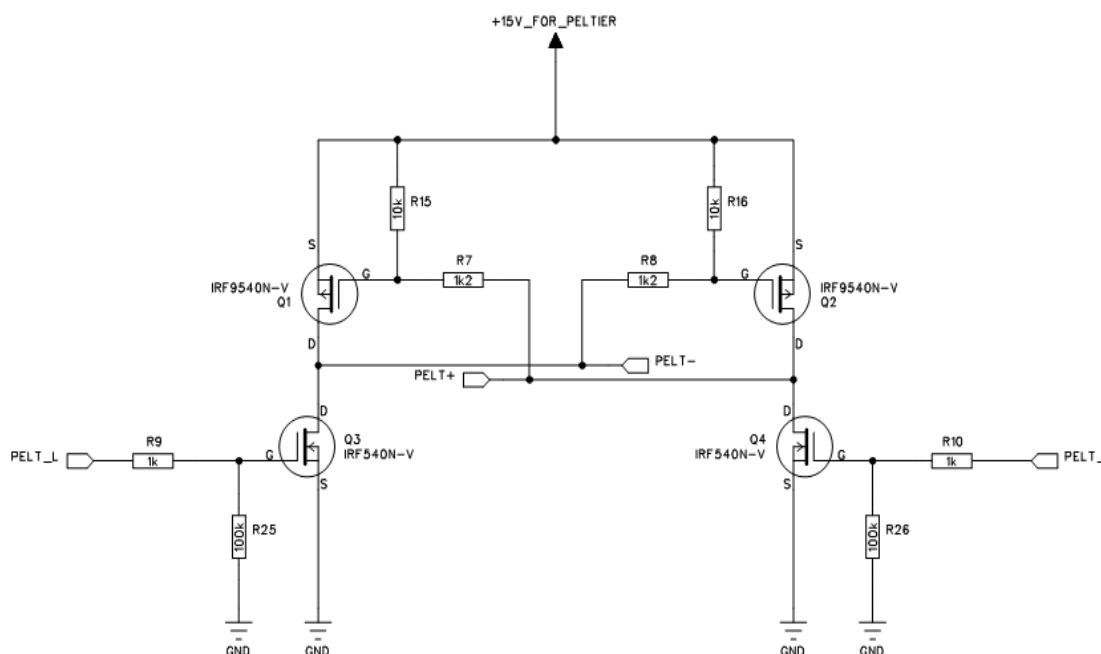
Elektricky jsou dva peltierovy články spojeny sériově. Napájení H-můstkem pomocí PWM. Ve vodiči nad peltierem je odporové čidlo. Slouží k vypnutí napájení při překročení kritické teploty. Na chladiči pod peltierem je čidlo sloužící jako ochrana před přehřátím. Při překročení 40°C spíná tepelná ochrana ventilátor. Obě čidla jsou pevně spojena s řídicí elektronikou a nelze je využít pro měření teploty regulátorem. Řídicí mikrokontroler nemá informaci o sepnutí těchto čidel.

Teplotně jsou články řazeny paralelně. Tepelné toky se sčítají. Je dosaženo vyšší hodnoty tepelného toku při stejném rozdílu teplot.

### 4.3 Napájení článku

Peltierův článek je stejnosměrná součástka napájená konstantním proudem. Výkon se řídí změnou velikosti proudu. Změnou polaritu se mění režim topení/chlazení.

V aplikaci bioreactoru a v řadě dalších je použito řízení pulsně šířkovou modulací. Řídicí mikrokontroler AduC841 má dva PWM výstupy, které řídí spínání H-můstku. Oba dva výstupy jsou použity, kvůli nutnosti měnit polaritu výstupního proudu. H-můstek je tvořen čtyřmi tranzistory MOSFET. Řídicí elektronika dále obsahuje dva spínané výstupy pro řízení ventilátorů na chladiči a ventilátoru pro chlazení výkonových tranzistorů. Napájení je spínaným zdrojem 15V/8,5A. Výrobek firmy PSI.



Obrázek 7: Schéma zapojení napájecího H-můstku.

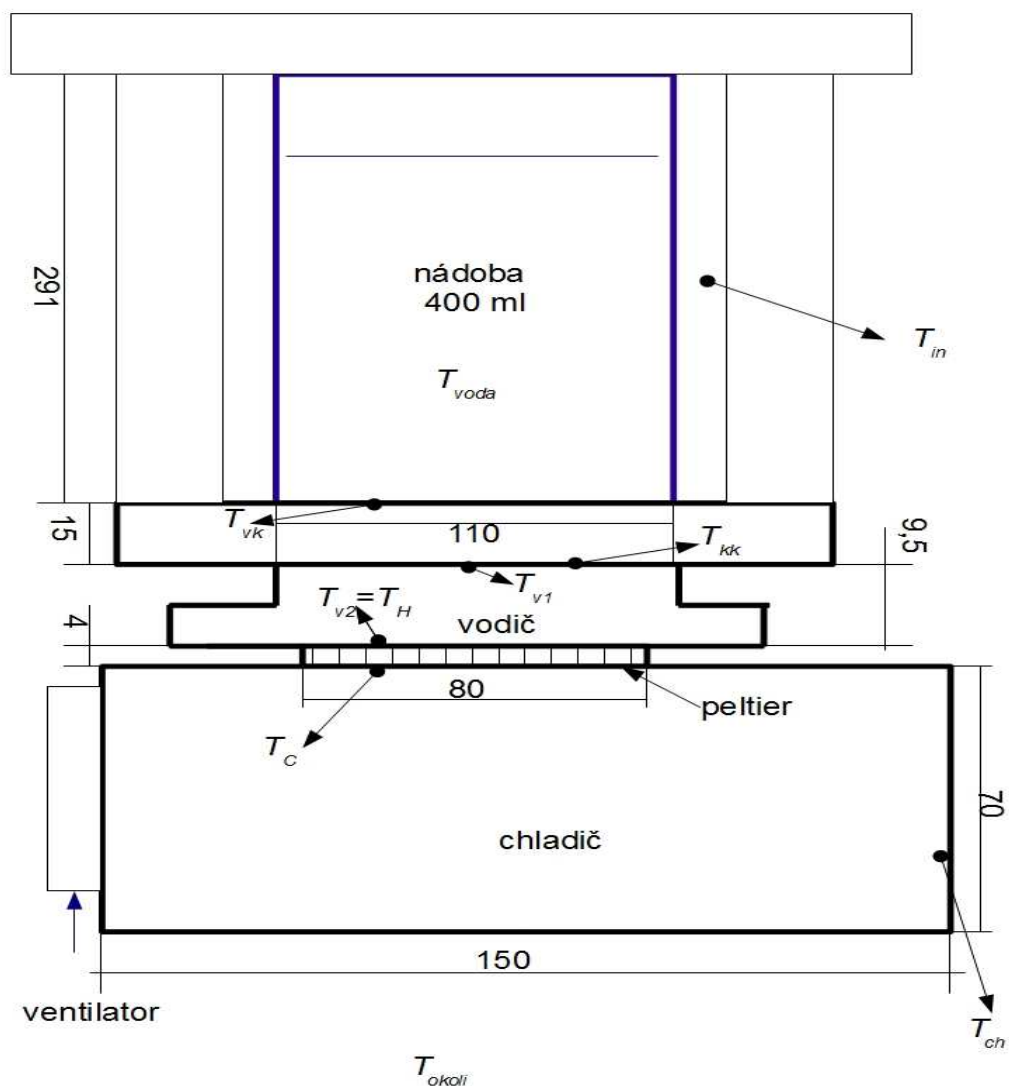
zdroj: Diviš. PSI. Thermoregulator – Peltier Unit.[PADS Logic], 2006

Použití pulsně šířkové modulace pro napájení peltierova článku může způsobovat řadu problému, které se v jiných aplikacích, jako je řízení motorů nebo jiných soustav nevyskytují. Kapitola 8 pojednává o ověření vlivu PWM na vlastnosti peltierova článku.

## 5 MODEL BIOREACTORU

Model bioreactoru byl pořízen na základě tepelných toků a akumulace tepelné energie v systému. Model je rozčleněn na samostatné dílčí části, které byly identifikovány zvlášť a které jsou spojeny tepelnými toky. S využitím rovnic z literatury [5] je popsán systém soustavu rovnic. Teplo se šíří převážně vedením.

### 5.1 Nádoba



Obrázek 8: Náskres konstrukce bioreactoru, pohled zepředu s rozměry a teplotami modelu

Nádoba má tvar kváдру. Boční stěny jsou skleněné. Zasunutím nádoby do těla bioreactoru vznikne vzduchová mezera, ve které dochází k přirozenému proudění vzduchu. Vrstva vzduchu je velice dobrý izolant. V ustáleném stavu má prostup tepla lineární průběh.

Dno nádoby je z nerez. Horní strana je přímo ve styku s roztokem uvnitř nádoby a spodní strana je přitlačována na vodič tepla, dochází zde k přenosu tepla od vodiče s určitou ztrátou. Přenos je zajištěn pouze mechanickým přtlakem bez použití teplovodivé pasty.

Víko je z kovu a obsahuje vývody pro měřící sondy a přívod plynů. Nedochází zde k samovolné výměně vzduchu s okolím a nad hladinou je vzduchová mezera. Tepelný tok v tomto směru je zanedbáván, vzhledem k izolačním vlastnostem vzduchu s přirozeným prouděním.

Obsah nádrže je míchán magnetickým míchadlem s volitelnou rychlostí míchání, nebo probubláváním plynu.

Pěstovaný vzorek je ve vodě s příměsí živin. Pro popis postačují fyzikální vlastnosti vody.

**Tabulka 5.1 :Parametry nádoby**

| název                                 | symbol v matlabu | velikost | jednotka                            |
|---------------------------------------|------------------|----------|-------------------------------------|
| objem                                 | Vv               | 0,0004   | m <sup>3</sup>                      |
| tepelná kapacita, vody                | cv               | 4180     | J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> |
| hustota                               | ro               | 981      | kg.m <sup>3</sup>                   |
| plocha skla                           | plocha_skla      | 0,0725   | m <sup>2</sup>                      |
| plocha dna v kontaktu s vodou         | Skv              | 0,034    | m <sup>2</sup>                      |
| celková plocha                        | Sko              | 0,0119   | m <sup>2</sup>                      |
| hustota dna (nerez)                   | rk               | 7850     | kg.m <sup>3</sup>                   |
| tepelná kapacita (nerez)              | ck               | 469      | J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> |
| tloušťka dna                          | sig              | 0,015    | mm                                  |
| tepelná vodivost (nerez)              | alfas            | 14       | W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>  |
| součinitel prostupu tepla (sklo)      | ksp              | 1,6      | W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>  |
| součinitel prostupu tepla dno (nerez) | kkv              | 70       | W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>  |
| součinitel prostupu tepla do vodiče   | kko              | 65       | W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>  |

Přenos systému modelem prvního řádu.

$$F(p) = \frac{1}{\frac{C}{G}p + 1} \quad C = C_v \rho V \quad G = k \cdot S \quad (5)$$

$C_v$  – tepelná kapacita

$V$  – objem

$k$  – tepelná vodivost

$S$  – plocha

Samotná nádoba:

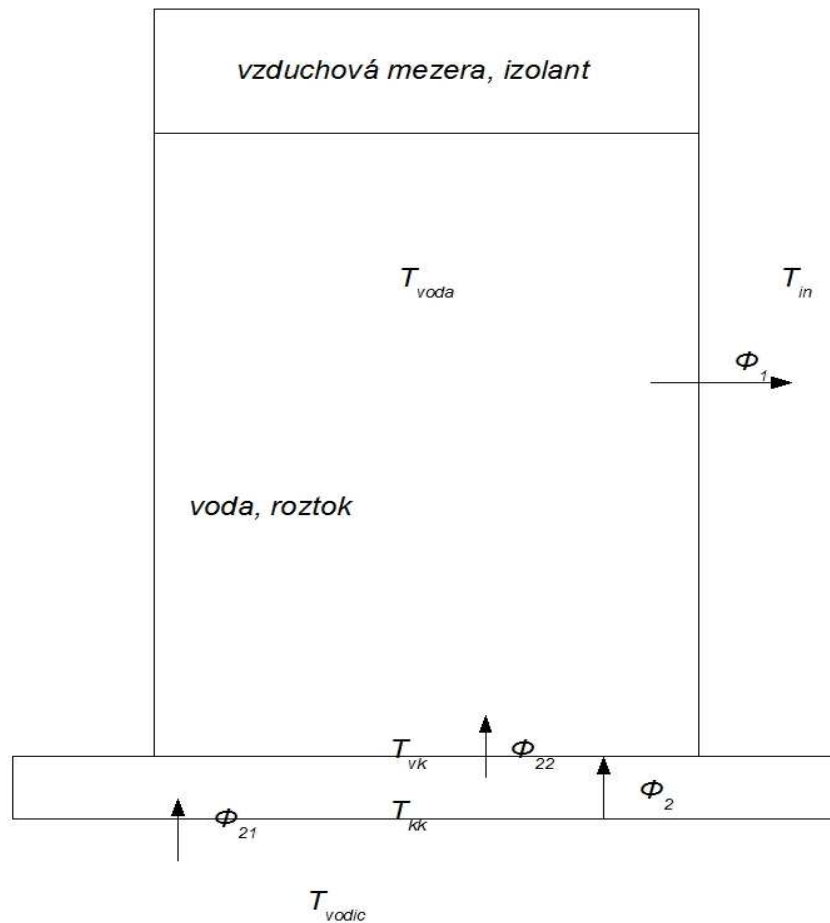
$$C = 1640 \text{ J.K}^{-1}, \quad G = 1,47 \text{ W. K}^{-1} \quad \tau = 1115 \text{ s}$$

$$F_{nádoba}(p) = \frac{1}{1115 p + 1}$$

Dno:

$$C = 306 \text{ J.K}^{-1}, \quad G = 0,39 \text{ W. K}^{-1} \quad \tau = 790 \text{ s}$$

$$F_{dno}(p) = \frac{1}{784 p + 1}$$



Obrázek 9: Tepelné toky v nádobě

Vývoj teploty vody a materiálu dna popisují tři diferenciální rovnice (6), (7), (8).

Teplotu vody v nádrži ovlivňují dva toky.  $\Phi_{22}$  přenáší energii od vodiče tepla a způsobuje požadovaný ohřev nebo chlazení. Tok  $\Phi_1$  je tok přes veškerou plochu skla nádrže do prostoru těla bioreactoru a přes stěny do okolí.

$$\rho_v c_v V_v \frac{dT_{voda}}{dt} = k_{kv} S_{kv} (T_{vk} - T_{voda}) - k_{sp} S_{sp} (T_{voda} - T_{in}) \quad (6)$$

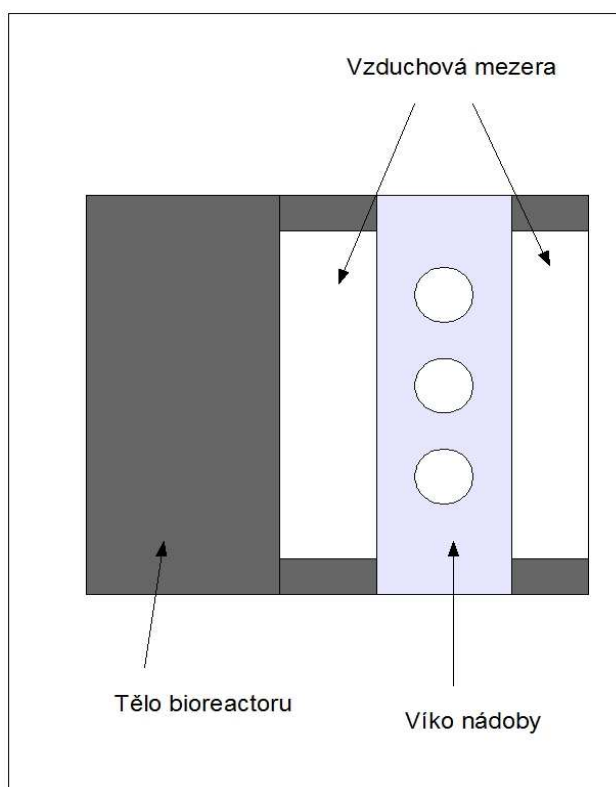
$$\rho_{dno} c_{dno} \frac{V_{dno}}{2} \frac{dT_{vk}}{dt} = \frac{\lambda_{dno}}{\delta_{dno}} S_{dno} (T_{kk} - T_{vk}) - k_{kv} S_{kv} (T_{vk} - T_{voda}) \quad (7)$$

$$\rho_{dno} c_{dno} \frac{V_{dno}}{2} \frac{dT_{kk}}{dt} = k_{kv} S_{kv} (T_{vl} - T_{kk}) - \frac{\lambda_{dno}}{\delta_{dno}} S_{dno} (T_{kk} - T_{vk}) \quad (8)$$

Rovnice (7) popisuje teplotu dna na rozhraní voda-kov. Rovnice (8) popisuje teplotu na styku s vodičem tepla od peltieru.

## 5.2 Tělo bioreactoru

Nádoba je zasazena v těle bioreactoru. Mezi stěnou nádoby a stěnou bioreactoru je vzduchová mezera, která slouží jako izolant. Celý řetězec sklo nádoby, vzduchová mezera tělo bioreactoru vytváří tepelný odpor v cestě tepelného toku do okolí. Tepelná kapacita vzduchu je zanedbatelná, ale v tomto odhadu je zahrnuta i kapacita sloupků. Ve zjednodušení lze uvažovat tento jev jako pouhý tepelný odpor bez tepelné kapacity. Ve finálním modelu je tepelná kapacita zahrnuta.



Obrázek 10: Bioreactor pohled zhora

$$\rho_{air} c_{air} V_{air} \frac{dT_{in}}{dt} = k_{sp} S_{sp} (T_{voda} - T_{in}) - k_{okoli} S_{okoli} (T_{in} - T_{okoli}) \quad (9)$$

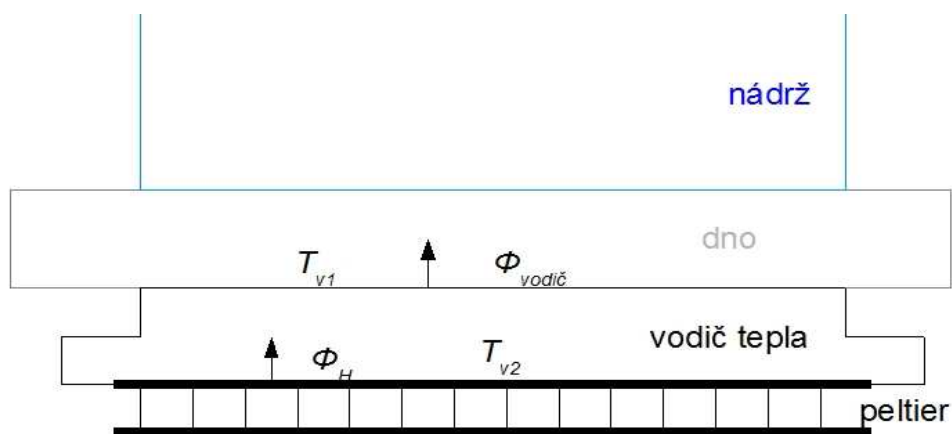
Teplo prochází z vody do okolí přes několik rozhraní s různými tepelnými vlastnostmi. Na rozhraních materiálů dochází k nestacionárnímu proudění.

### 5.3 Vodič tepla

Mezi peltierem a dnem nádoby je kovový vodič tepla, který usměrňuje tepelný tok z plochy peltierů do dna nádoby s jiným půdorysem. Vodič tepla je tvořen homogenním měděným blokem. V boku jsou dva otvory pro nasunutí teplotních čidel. Koeficient prostupu tepla z vodiče do dna nádoby byl určen experimentálně.

Vodič tepla je pevně přišroubován do chladiče. Prostup tepla do chladiče přes šrouby je zanedbatelný. Peltierovy články jsou potřeny teplovodivou pastou pro lepší odvod tepla.





Obrázek 11: Vodič tepla od peltieru

Tabulka 5.2 :Parametry vodiče tepla

| název                                | symbol v matlabu | velikost | jednotka                            |
|--------------------------------------|------------------|----------|-------------------------------------|
| objem                                | V_vodic          | 5,32e-5  | m <sup>3</sup>                      |
| plocha                               | S_vodic          | 0,0056   | m <sup>2</sup>                      |
| hustota (měď)                        | Rocu             | 8960     | kg.m <sup>3</sup>                   |
| tepelná kapacita (měď)               | Ccu              | 385      | J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> |
| měrná tepelná vodivost (měď)         | alfa_Cu          | 395      | W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>  |
| tloušťka                             | v_c              | 0,0095   | mm                                  |
| součinitel prostupu tepla, do vodiče | kko              | 65       | W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>  |

Přenos systému prvního řádu podle rovnice (5)

$$C = 183 \text{ J.K}^{-1}, \quad G = 0,36 \text{ W.K}^{-1} \quad \tau = 503 \text{ s}$$

$$F_{\text{vodič}}(p) = \frac{1}{508p + 1}$$

Teploty  $T_{v1}$  a  $T_{v2}$  jsou teploty na styku s dnem nádrže a peltierem. Koeficienty prostupu tepla byly odhadnuty z naměřených dat.

$$\rho_{cu} c_{cu} \frac{V_{cu}}{2} \frac{dT_{v1}}{dt} = \frac{\alpha_{cu}}{\delta_{cu}} S_{cu} (T_{v2} - T_{v1}) - k_{kv} S_{kv} (T_{v1} - T_{kk}) \quad (10)$$

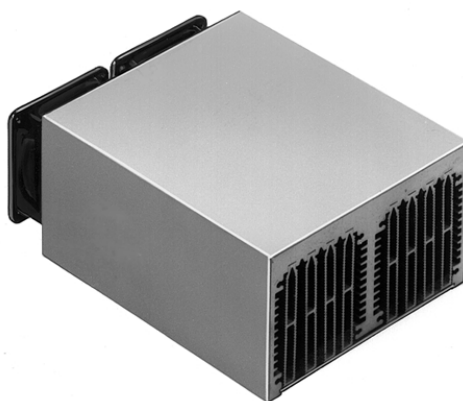
$$\rho_{cu} c_{cu} \frac{V_{cu}}{2} \frac{dT_{v2}}{dt} = \Phi_H - \frac{\alpha_{cu}}{\delta_{cu}} S_{cu} (T_{v2} - T_{v1}) \quad (11)$$

$\Phi_H$  – tepelný tok z teplé strany peltierova článku

## 5.4 Chladič

K chladné straně peltieru je přichycen chladič s dvojicí ventilátorů. Chladič je zabudovaný v tunelu v základně bioreactoru. Při ohřevu se zapíná ventilátor až při dosažení kritické teploty 40 °C. Do této teploty je chlazení jen přirozeným prouděním okolního vzduchu přes žebra chladiče. Při překročení kritické teploty, nebo při chlazení je ventilátor zapnutý. Zapnutí ventilátoru způsobuje výrazné snížení tepelného odporu chladiče.

Chladič je typu Fisher SK466 2002 vyrobený z hliníku. Výrobce uvádí tepelný odpor  $R_t$  0,06 – 0,135 K.W<sup>-1</sup>.



Obrázek 12: chladič.

zdroj: *fischer elektronik*, Products [online]. [cit. 2010-09-20]  
 <[http://www.fischerelektronik.de/index.php/fcool\\_en/?&L=1](http://www.fischerelektronik.de/index.php/fcool_en/?&L=1)>

**Tabulka 5.3: Parametry chladiče**

| název                               | symbol v matlabu | velikost            | jednotka                            |
|-------------------------------------|------------------|---------------------|-------------------------------------|
| hmotnost                            | m1               | 1,6                 | kg                                  |
| plocha                              | S_vodic          | 0,0056              | m <sup>2</sup>                      |
| tepelná kapacita (hliník)           | c1               | 896                 | J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> |
| měrná tepelná vodivost              | hlinik_vodivost  | 273                 | W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>  |
| celková plocha pro vyzařování       | Af               | 0,3                 | mm                                  |
| součinitel prostupu tepla, do okolí | hh               | 2,38                | W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>  |
| rozměry d x š x v                   |                  | 0,125 x 0,15 x 0,07 | m                                   |

Soustava prvního řádu podle rovnice (5)

$$C = 1433 \text{ J.K}^{-1}, \quad G = 2,4 \text{ W.K}^{-1}, \quad \tau = 597 \text{ s}$$

$$F_{chladič}(p) = \frac{1}{597p + 1}$$

Chladič je modelován jako hmota s tepelnou kapacitou, vstupem je teplo z chladné strany peltierova článku a okolní teplota. Bez použití ventilátoru bude tepelný odpor větší než udává výrobce. Plocha žebrování je odhadnuta z měření.

$$m_{ch} c_{ch} \frac{dT_{ch}}{dt} = \frac{A_f}{R_t} (T_{okoli} - T_{ch}) - Q_C \quad (12)$$

## 5.5 Měřicí sonda

V pěstovaném roztoku je ponořena měřicí sonda. Sonda obsahuje odporové čidlo teploty Pt1000. Lze volit sondy pro měření pH roztoku, koncentraci CO<sub>2</sub> nebo O<sub>2</sub>. Měřicí čidlo je v uvnitř skleněné sondy. Časová konstanta sondy je v řádu jednotek sekund, vzhledem k časovým konstantám soustavy je zanedbatelná.

## 6 MATLAB - SIMULINK

Na základě výše uvedených vztahů byl vytvořen model tepelné soustavy v prostředí MATLAB-Simulink. V Simulinku je vytvořen model, který odpovídá soustavě diferenciálních rovnic. Pro lepší přehlednost je model rozdělen na několik subsystémů. Každý subsystém obsahuje model části soustavy. Vstupy, výstupy které spojují jednotlivé subsystémy jsou tepelné toky, které mají fyzikální podstatu v reálném systému.

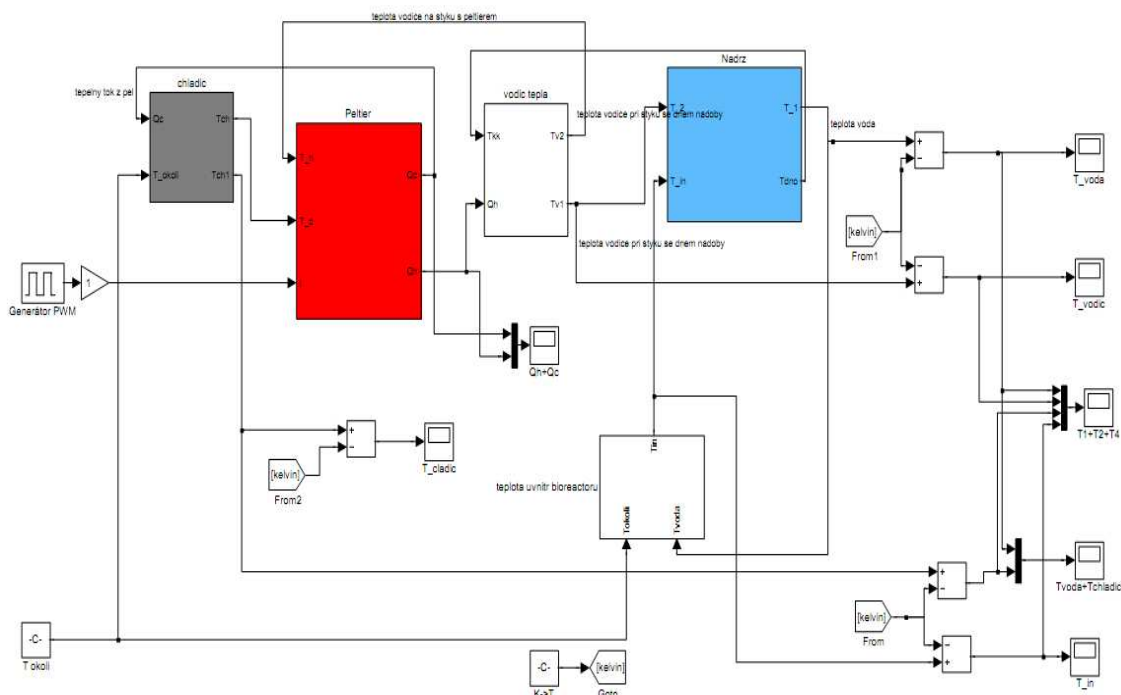
Původně jednoduchý model se postupně rozšiřoval aby co nejvěrněji popisoval reálný systém. Při řízení se uvažuje využít model, který se bude adaptovat podle aktuálních dat a který bude poskytovat informaci o teplotách, které nelze přímo měřit. Pro tyto účely byl vytvořen zjednodušený model, který neposkytuje tak dokonalou představu o chování systému ale je výpočetně mnohem jednodušší.

Parametry, které nelze určit z geometrických rozměrů, nebo vlastností materiálu bylo potřeba určit experimentálně na základě měřených dat. Při hledání neznámých parametrů byla využita funkce *fminsearch*, která minimalizuje kritériální funkci. Pro představu o chování systému nestačí měření pouze teploty vody. Dále je potřeba znát teplotu druhé strany peltierova článku. Nejprístupnějším místem jsou žebra chladiče. Pro získání těchto dat bylo na chladič nalepeno odporové čidlo teploty Pt1000. Je potřeba aby model odpovídal oběma průběhům teplot, jak vody tak i teploty chladiče. Minimalizovaná kritériální funkce zahrnuje oba průběhy. Kritériální funkce je zvolena jako součet kvadrátů odchylek.

Soubor *model\_subsys.mdl* obsahuje simulinkovský model. Před zahájením simulace je potřeba spustit skript *parametry\_modelu.m*, který obsahuje všechny parametry potřebné k simulaci. Tento skript volá funkci

```
[Z, S1, K1, R1, S2, K2, R2] = pel_param(Th, dTmax, Vmax, Imax, Qmax);
```

která vypočítá parametry peltierova článku podle rovnic popsanych v literatuře [7]. Je potřeba mít tento skript v pracovním adresáři.



Obrázek 13: Simulační schéma v Simulinku

Soubory *model\_2rad.mdl* a *parametry\_prenosy.m* obsahují zjednodušený model soustavy.

všechny soubory potřebné ke spuštění simulace a změřená data jsou uložena na CD ve složce *matlab/modelovani*, které je přílohou této práce. V příloze jsou zobrazeny detailně jednotlivé bloky.

Při tvorbě této práce byl použit MATLAB verze 7.1. Novější verze matlabu obsahuje speciální toolbox pro simulaci tepelných soustav. Součástí tohoto toolboxu jsou bloky s tepelnou kapacitou, odporem a dalšími prvky, které se v tepelných soustavách vyskytují. Jednotlivá spojení mezi bloky mají charakter tepelného toku. Použití tohoto nástroje značně zjednoduší modelování tepelného systému. Kromě krátkého seznámení nebylo možné delší práce s toolboxem. Výhodou konstrukce za použití integrátorů je na první pohled zřejmá analogie schématu s diferenciálními rovnicemi.

## 7 IDENTIFIKACE

Pro identifikaci soustavy byl změřen soubor dat s průběhem teplot. Měřil se průběh teplot při různých výkonech a také pokud to bylo možné, jednotlivé části systému oddělení tak aby se minimalizoval počet neznámých parametrů. Bioreactor je vybaven jen jedním vstupem pro připojení čidla teploty. Pro přesnou identifikaci by bylo potřeba měřit teplotu současně na několika místech. Řešením bylo měření opakovat za stejných podmínek. Vzhledem k časovým konstantám soustavy je tento postup značně časově náročný. Další možností bylo použít externího zařízení pro záznam průběhu teploty. Měření probíhala v místnostech kde se udržovala stálá teplota. Měření začínala z ustálených tepelných podmínek a tak lze říct, že změřené teploty odpovídají teplotě celého zařízení na začátku měření. Všechny integrátory mají nastaveny tyto počáteční podmínky.

### 7.1 Sběr dat

Měřená data jsou ukládána v počítači. V průběhu práce byly využity dva způsoby komunikace.

V komerčním uspořádání je bioreactor spojen po sériové lince s notebookem kde běží upravený operační systém s linuxovým jádrem, který řídí celý experiment a je schopen ovládat všechny části zařízení. PC ukládá data na pevný disk, nebo může sloužit jako server a být připojen na síť. Z webu lze stáhnout Java applet pomocí kterého je možné celé zařízení ovládat na dálku.

Firma PSI vyvinula, pro potřeby vývoje, Java skript pro MATLAB, který umožňuje nastavovat regulátor v bioreactoru na konstantní výkon, vyčítat měřenou teplotu a po síti zprostředkovat tuto komunikaci.

Byl vytvořen program v matlabu, který využívá vývojový Java skript pro nastavení výkonu regulátoru a v nastavené periodě k vyčítání měřené teploty. Změřená data jsou ukládána na disk pro další zpracování. Skript *mereni.m* je definován jako funkce a je volán z příkazové řádky matlabu.

```
function [status] = mereni(nazev_souboru, Tvz, delka_mereni, vykon)
```

Vstupem je název souboru pro uložení dat, perioda vzorkování, délka měření a hodnota konstantního výkonu.

Další možností je použít servisní kabel a po sériové lince se spojit přímo s regulačním mikrokontroler. Firmware regulátoru obsahuje soubor příkazů pro komunikaci po sériové lince. Byly využity příkazy pro nastavení konstantního výkonu regulátoru, a pro čtení měřené hodnoty. Tyto příkazy budou potřeba i při zamýšleném řízení bioreaktoru pomocí PC. Kdy PC bude počítat regulační algoritmus a po RS-232 řídit proces.

I pro komunikaci po sériové lince byl použit MATLAB, který obsahuje knihovnu funkcí pro komunikaci po sériové lince. Vytvořený skript ukládá změřená data v nastavené periodě. Skript *mereni\_ser.m* je napsán jako funkce a je možné jej volat z příkazové řádky.

```
function [status] = mereni_ser(nazev_souboru, Tvz, delka_mereni)
```

Vstupem jsou název souboru pro uložení změřených dat, perioda vzorkování a délka měření.

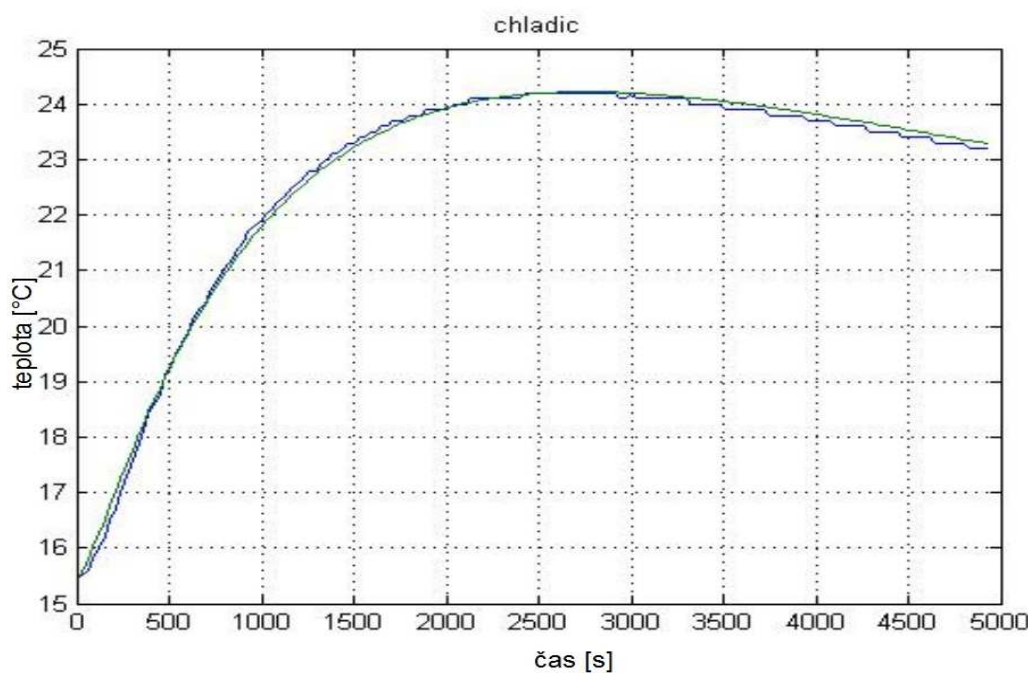
Všechny použité soubory jsou obsaženy na CD ve složce matlab/mereni, které je přílohou této práce.

## 7.2 Identifikace skokem teploty

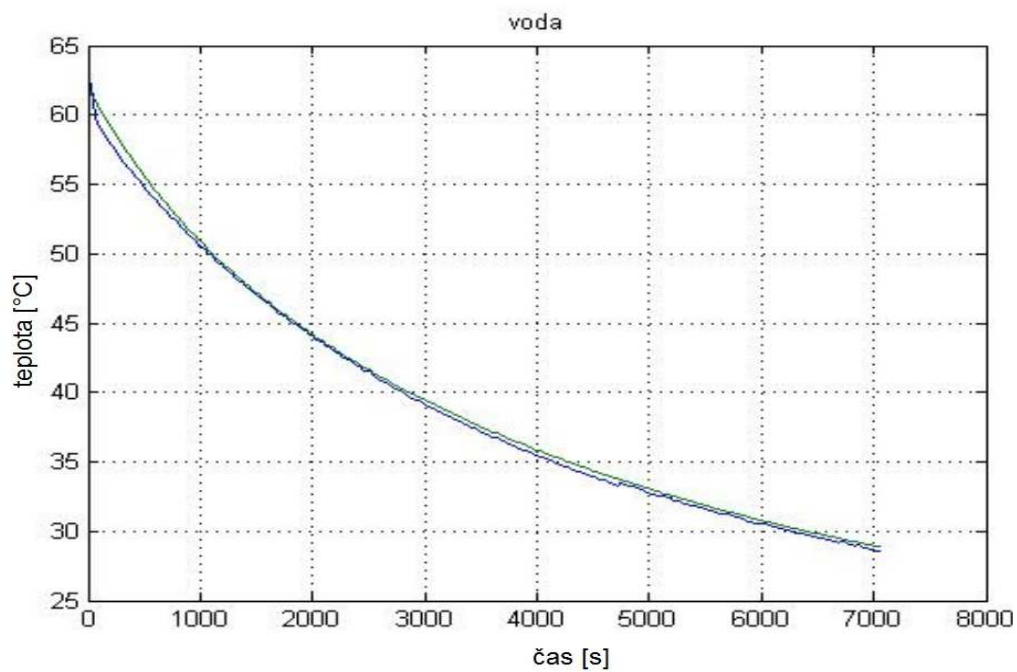
Pro identifikaci jednotlivých částí systému byl použit následující postup:

Do bioreaktoru byla nalita voda o teplotě 80 °C a měřilo se samovolné chladnutí vody v nádobě. Tepelný tok prostupuje peltierovým článkem, který není napájen, do chladiče. Cílem bylo identifikovat neznámé parametry prostupu tepla bez vlivu výkonu peltierova článku.

Identifikací soustavy po částech se snížilo množství neznámých parametrů, které je potřeba identifikovat.



Obrázek 14: Průběh teploty chladiče při nalití horké vody a postupné chládnutí, s nulovým výkonem, zelená: průběh simulace, modrá: měřená data

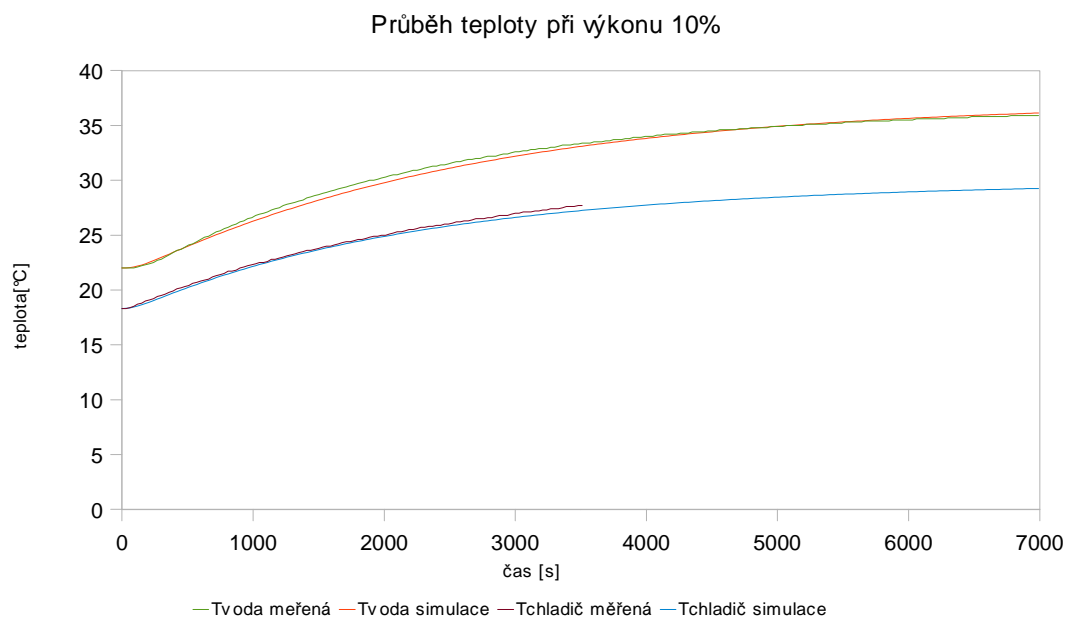


Obrázek 15: Průběh chládnutí vody v nádrži po nalití horké vody, zelená: průběh simulace, modrá: měřená data. Nulový výkon



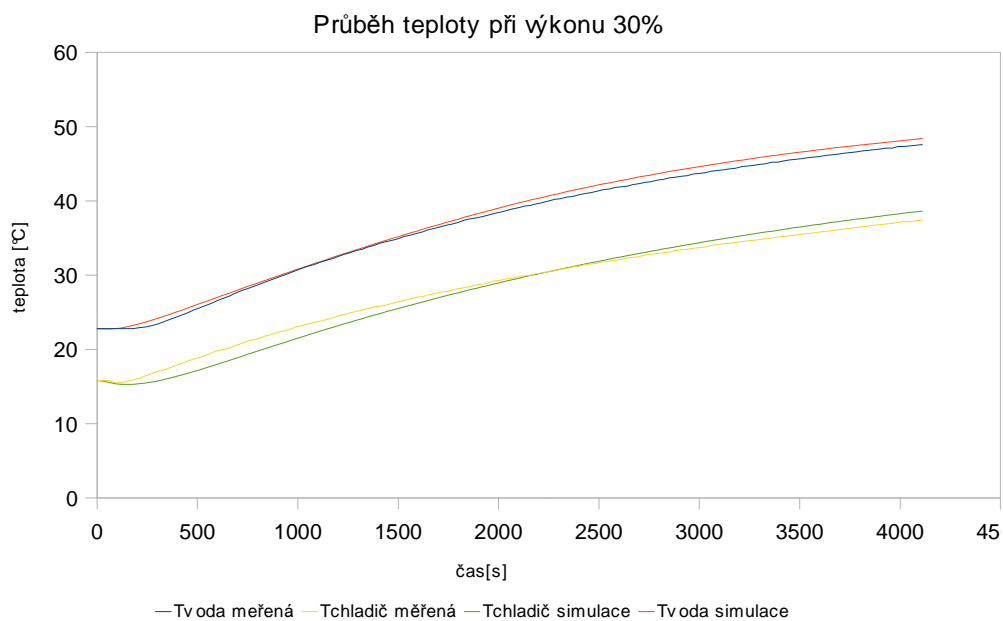
### 7.3 Srovnání výsledků simulace s měřenými průběhy

Pro ověření správného nastavení konstant modelu byly srovnány průběhy teploty vody a chladiče při výkonech 10 %, 30 %, 50% a 70 %.

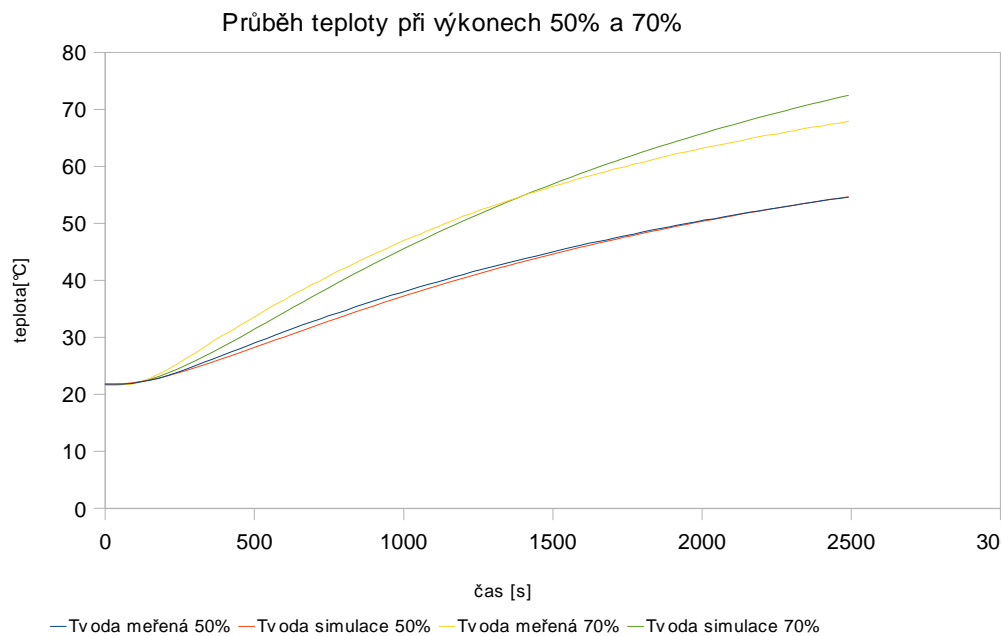


Obrázek 16: Průběh teploty vody a chladiče, změřená data a simulace.

Výkon 10 %



*Obrázek 17: Průběh teploty při výkonu 30 %, změřená data a simulace*



*Obrázek 18: Průběh teploty vody a chladiče při výkonech 50 a 70%, změřená data a simulace.*

Výše zobrazené průběhy reflektují míru shody modelu s reálnými daty. Vytvořený model slouží k ladění regulátoru před jeho nasazením v soustavě. Je tedy požadována vysoká míra shody tak aby bylo zaručeno, že regulátor odladěný při simulacích bude stejně reagovat i při řízení reálné soustavy.

## **7.4 Rozbor poznatků získaných z identifikace**

Při práci na identifikaci systému se objevila řada otázek. Pro návrh regulátoru je zásadní vliv nelineární charakteristiky výkonu peltierova článku v závislosti na nastaveném výkonu. Při prvotním sestavování modelu byla uvažována možnost, nahradit napájení PWM signálu spojitým proudem o výkonu , který odpovídá energii dodané PWM. Má vliv perioda PWM na chování článku? Dalo by se vhodným nastavením periody ovlivnit chování systému? V literatuře je jen málo informací o vlastnostech při různých frekvencích, většina diskuzí na toto téma končí konstatováním: „že to nějak funguje.“

V aplikacích je běžně využíváno napájení PWM.

Dala by se zlepšit linearita systému pouhou softwarovou změnou? K zodpovězení těchto otázek byl vytvořen přípravek, který slouží k testování vlastností peltierova článku při využití v bioreactoru a i v jiných aplikacích.

## 8 OVĚŘENÍ DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ PELTIEROVA ČLÁNKU

Použití PWM signálu pro napájení bylo zvoleno bez podrobnější analýzy vlivu na systém. Pro lepší pochopení chování soustavy bylo třeba ověřit vliv periody PWM.

Mikrokontroler AduC841 obsahuje dva PWM výstupy. Perioda PWM je nastavena na 50 ms, při střídě 10 % to představuje pulzy s délkou trvání 5 ms. Peltierův článek je součástka, která má být napájena stejnosměrným proudem.

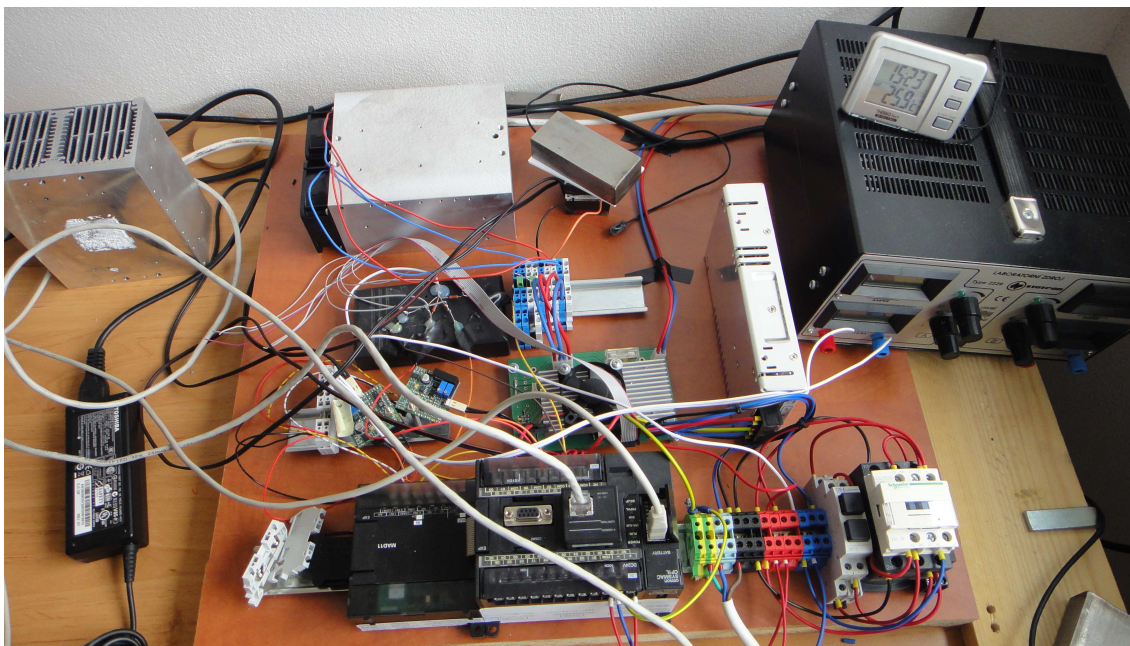
Sestavený přípravek by měl ověřit změny tepelného výkonu při různých periodách PWM. Pro testování je nastavena střída PWM na 10 % a perioda se mění od 50ms do 500 ms.

### 8.1 Přípravek pro testování

Pro zjednodušení a snazší manipulaci byla sestavena testovací jednotka pro ověření vlastností peltierova článku.

Sestava je tvořena:

- Peltierův článek MELCOR HT8–12-40
- hliníkový a nerezový blok, slouží k odvodu tepla
- deska s elektronikou H – můstku
- spínaný zdroj 15V / 10A
- odporové snímače teploty Pt1000
- převodník pro odporové snímače s výstupem 0 - 5 V
- laboratorní zdroj
- PLC Omron CP1L s dvojicí analogových vstupů a PWM výstupů
- PC pro ukládání naměřených dat



Obrázek 19: Testovací sestava

### 8.1.1 Model tepelné soustavy

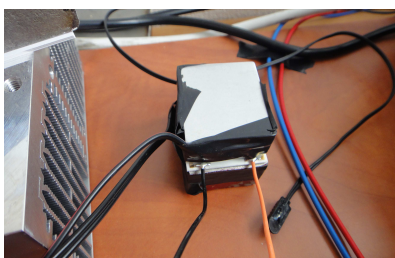
Model tepelné soustavy představuje peltierův článek mezi dvěma bloky z materiálu s různou tepelnou vodivostí. Při topení je „teplá“ horní strana a „studená“ spodní strana.

Spodní blok tvoří kvádr z nerez oceli s parametry:

- Objem  $32 \text{ cm}^3$
- Tepelná kapacita  $469 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Horní blok tvoří kvádr z hliníku s parametry:

- Objem  $32 \text{ cm}^3$
- Tepelná kapacita  $896 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$



Obrázek 20:

*Peltier mezi*

*bloky kovu*

Pro lepší přenos tepla je z obou stran aplikována vrstva teplovodivé pasty.

## 8.1.2 Thermo peltier driving

Deska z bioreactoru pro řízení napájení článků. Obsahuje H-můstek pro spínání napájení článku. Dva TTL vstupy pro spínání obou polarit proudu. Umožňuje topit nebo chladit. Dále vstup pro spínání externího ventilátoru, v bioreactoru spíná ventilátor na chladiči. A vstup pro spínání interního ventilátoru, slouží k chlazení chladiče s připevněnými výkonovými tranzistory.

Elektrické zapojení je na Obrázku 7 v kapitole 5.3.

Napájení je ze spínaného zdroj 15V/10A.

## 8.1.3 Snímače teploty

Na obou blocích jsou připevněny odporové snímače teploty Pt1000. Teplota se měří z boku ve stejné vzdálenosti od strany na které leží peltier. K vyhodnocení signálu ze snímače byl použit převodník T-U Convertor s obvodem XTR114 vyrobený ve firmě PSI. Tento převodník je běžně používaný s výstupe I<sup>2</sup>C. Pro účely zpracování dat v PLC byl využit napěťový výstup. Bylo potřeba udělat několik úprav na zapojení aby se zvětšil rozsah výstupního signálu, tak aby se lépe využilo rozsahu analogového vstupu PLC 0 – 5 V.

## 8.1.4 PLC Omron

K řízení experimentu bylo využito PLC Omron CP1H s rozšiřujícím modulem dvou analogových vstupů a jednoho výstupu. Automat má 12 digitálních výstupů. Dva jsou konfigurovatelné jako PWM s rozsahem 0,1 až 6553,5 Hz a s možností měnit střihu v kroku po 0,1 %. Modul CPU disponuje dvojicí komunikačních slotů pro komunikační moduly RS-232, RS-485 a nebo Ethernet.

Pro spojení s PC byl využit ethernetový modul. Komunikační modul podporuje protokoly UDP, TCP/IP. V aplikační vrstvě je implementován protokol FINS communication. Což je otevřený komunikační protokol vyvinutý firmo Omron pro komunikaci s jednotkami PLC. Protokol využívá struktury klient-server a umožňuje jednoduchý přístup do všech paměťových oblastí PLC pro vyčtení i zápis dat.

## 8.1.5 Programové vybavení

Ve vývojovém prostředí CX-programmer pro programovatelné automaty Omron byl napsán program, který zajišťuje řízení experimentu. Nastavuje frekvenci a střihu PWM signálu a v zadaných intervalech tyto parametry mění podle požadovaného průběhu. Dále se stará o spouštění a ukončení experimentu a ovládá ostatní výstupy pro spínání externího a interního ventilátoru.

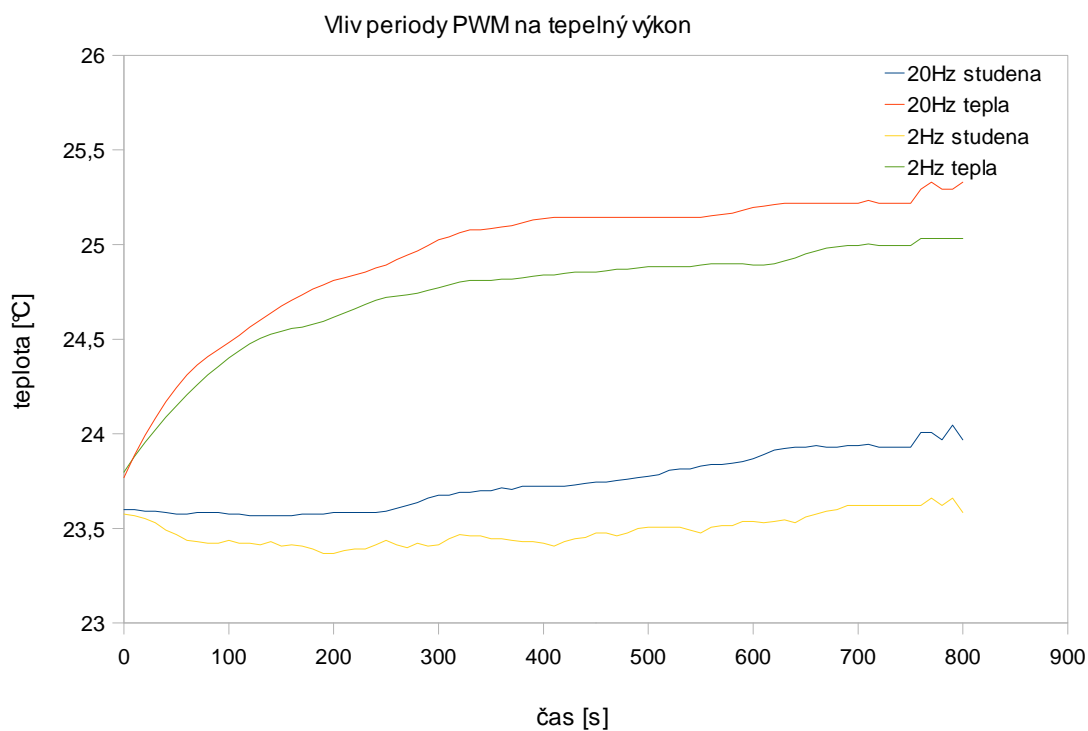
Při spojení PLC – PC se PLC chová jako server a odpovídá na dotaz klientem(PC) poslané po Ethernetu. V PC byla napsána klientská aplikace. Spojení je realizováno přímo a tak postačuje jednoduchý UDP protokol. FINS komunikace definuje tvar rámce. Klientská aplikace se dotazuje na příslušnou datovou oblast s požadavkem na čtení uložené hodnoty nebo zápis dat. Podle kódu funkce lze volit přístup po bitech nebo po slovech. Takto jednoduše je možné vyčítat změřená data a ovládat celý experiment zápisem do příslušných datových oblastí. Na straně PLC není potřeba nic programovat. Je-li potřeba aby klient reagoval na nějakou událost musí periodicky vyčítat příslušnou část paměti.

V PC běží klientská aplikace napsaná v jazyce C++ ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2005, která se cyklicky dotazuje na změřená data v dané periodě a tyto data ukládá na disk do textového souboru.

Vytvořené programy jsou uloženy na CD v souboru PLC, které je přílohou této práce.

## **8.2 Výsledky experimentu**

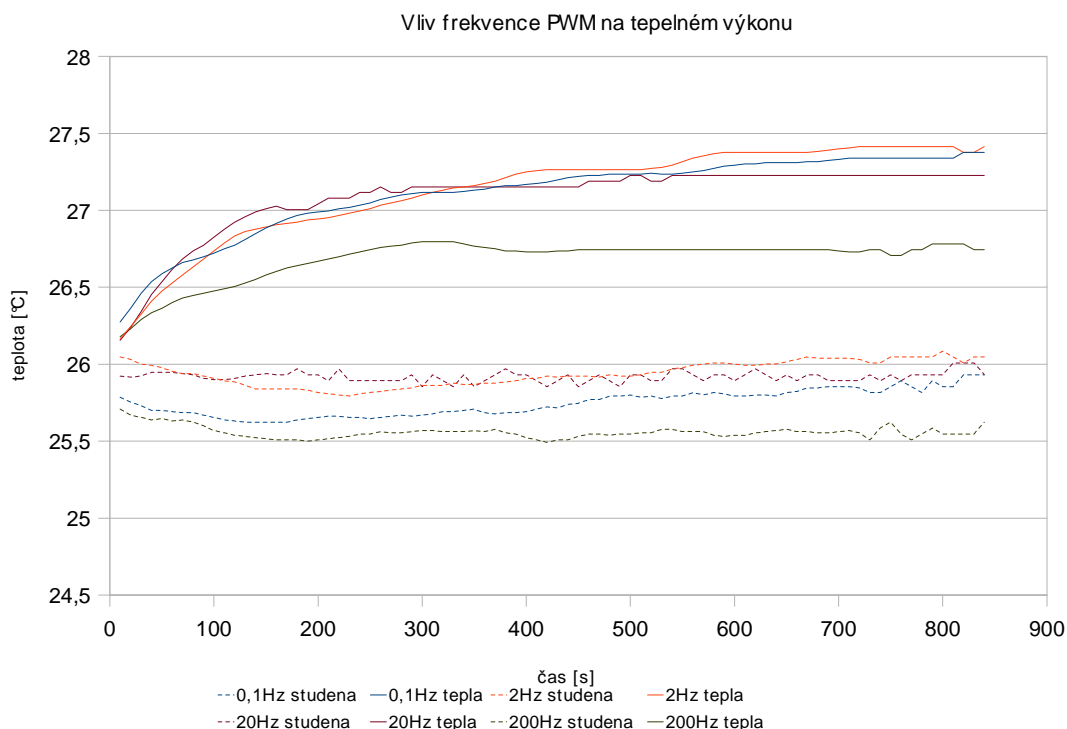
Bylo provedeno množství měření za různých podmínek. Měření probíhalo v místnosti, kde není možné zajistit úplně konstantní teplotu, ale rozptyl teplot neovlivnil zásadně měření. Teplota místnosti je nižší ráno a přes den mírně vzroste, z tohoto důvodu jsou porovnávána jen měření která probíhala ve stejný časový úsek dne.



*Obrázek 21: Průběh teploty peltierova článku při různých periodách PWM. Zobrazeny teploty na teplé i studené straně.*

Na obrázku 21 je znázorněn průběh teploty na „teplé“ a „studené“ straně při frekvenci PWM 20 Hz a 2 Hz při střídě 10%. Je vidět že nárůst tepelného výkonu, který se projeví ve zvýšené teplotě obou stran je prakticky zanedbatelný. Výkon definovaný jako rozdíl teplot  $\Delta T$  zůstává stejný.





Obrázek 22: Průběh teplot peltierova článku pro různé frekvence PWM, teplota teplé i chladné strany

Na obrázku 22 jsou změřené průběhy teplot. Tečkované křivky znázorňují teplotu na studené straně a plné křivky teplotu na teplé straně.

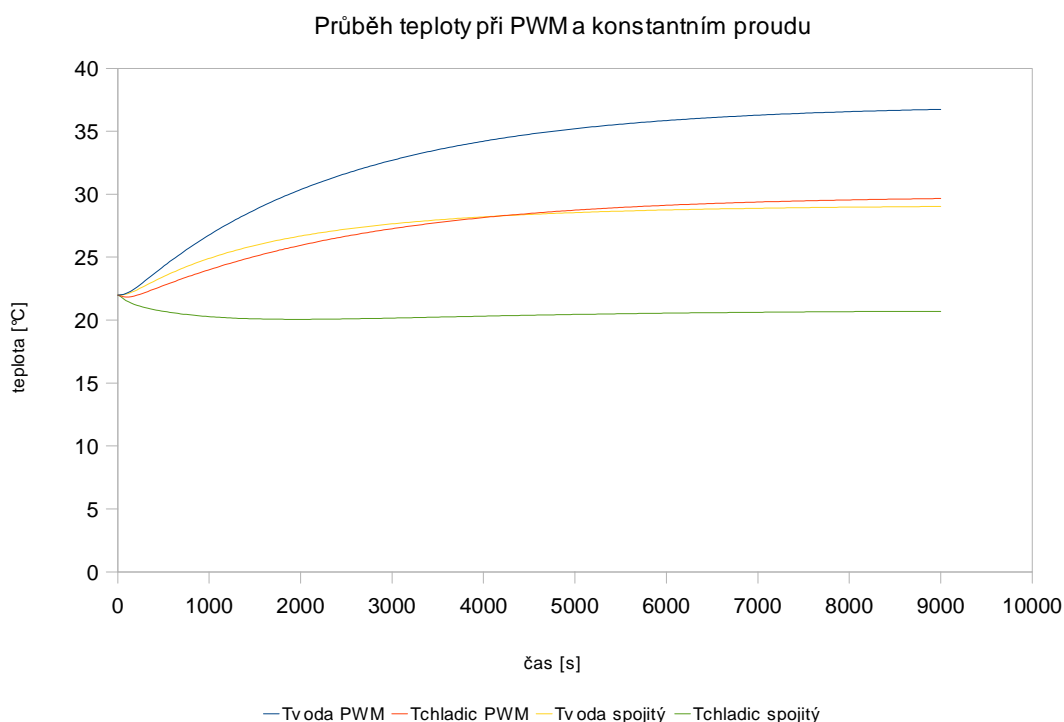
### 8.3 Zhodnocení výsledků experimentu

Ze změřených průběhů, Obrázek 21 a 22 není vidět výrazná změna tepelného výkonu v závislosti na periodě PWM. V obrázku 21 je vidět mírné zvýšení tepelného výkonu, ale toto zvýšení je prakticky zanedbatelné a mohlo být způsobeno změnou teploty okolí. Lze prohlásit, že pokud je peltierův článek provozován při nízkých frekvencích do 250 Hz, není pozorovaný žádný vliv. V diskuzi na webu [6] je popsán problém, který byl pozorován při provozování na vyšších frekvencích. Tento jev, však nebyl nikde v literatuře příliš objasněn. V bioreactoru je zvolena frekvence 20 Hz, tato frekvence je naprosto bez problémová. Vzhledem k časovým konstantám soustavy by bylo možné volit frekvenci mnohem nižší.

V praxi je běžné použití PWM místo spojitě změny proudu. Použití PWM nese sebou určité výhody. Hlavním přínosem je vyšší efektivita přenosu energie. Tranzistory v režimu On – Off mají mnohem nižší ztráty.

Použití pulsně šířkové modulace sebou však nese jeden problém, který se nejvíce uplatňuje při malé střídě. Peltierův článek se chová jako pumpa, která pumpuje teplo z chladné strany na teplou. Tento směr přestupu tepla je proti přirozenému šíření tepla podle teplotního gradientu. Tedy z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou. Díky průchodu proudu článkem dochází k nucenému prostupu tepla opačným směrem. Pokud ovšem neprochází článkem žádný proud obrací se prostup tepla zpět přirozeným směrem podle teplotního gradientu. Peltierův článek má ve vypnutém stavu poměrně malý tepelný odpor. Při střídě menší než 50 % je většinu času ve vypnutém stavu a dochází k opačnému prostupu tepla než jaké je požadováno. Tento jev má za následek snížení účinnosti. Jednoduše vyjádřeného jako snížení  $\Delta T$ , oproti napájení spojitě regulovaným proudem o stejném výkonu.

Dochází k výraznému ohřevu studené strany. Je-li teplota studené strany vyšší při sepnutí proudu ve stejném směru dojde k vyššímu ohřevu teplé strany. Tímto efektem je možné vysvětlit zvýšený tepelný výkon a nižší rozdíl teplot při využití PWM oproti spojitě regulaci proudu. Neplatí že proud se střídou 10 % má stejný účinek jako spojitý proud o velikosti 10 % maximálního napájecího proudu.



*Obrázek23: Srovnání průběhu tepelného výkonu při napájení spojitým proudem a PWM*

*Obrázek 23* demonstruje tento efekt. Je zde vidět naprosto odlišný průběh teplot. Oproti jiným aplikacím kde je použit PWM jsou časové konstanty článku tak malé že se

uplatňuje výše popsany efekt. Při topení se zvýší efektivita. Problém nastane, je-li požadováno chladit. Při chlazení efektivita rapidně klesá. Pokud by byl systém navrhován s požadavkem na co nejvyšší efektivitu chlazení, měla by se uvažovat možnost použít LC filtru, který by vyhladil proud. Peltierovy články jsou napájeny řádově jednotkami ampér, konstruovaný filtr by musel být dimenzován na takto velké proudy což sebou nese požadavek na poměrně masivní součástky.

Výše popsany efekt musí být zohledněn hlavně při tvorbě modelu, kde nelze zjednodušit model nahrazením napájení spojitým proudem o stejném výkonu.

## 9 VOLBA REGULÁTORU

Jednoduchý PI regulátor, který v současnosti pracuje v zařízení, není schopen poskytnout požadovanou kvalitu regulace. Problém plyne z nelinearity soustavy. Je potřeba uvažovat složitější strukturu regulace. Další omezení představuje měření teploty pouze na jednom místě. Výkon peltierova článku je závislý na proudu, ale také na teplotách obou stran. Pokud tyto teploty jsou neznámé, nelze určit jaký je výkon dodaný do soustavy. Pokud není známý výkon akčního členu, je velice těžké splnit podmínky jaké jsou na regulaci kladeny. Dále na systém působí řada poruch. Zejména vliv okolní teploty je významný a pokud by to bylo měřitelné i lehce kompenzovatelný. Ideálním řešením by bylo rozšířit počet měřicích míst a snímat teplotu na víc místech současně. A v takovém případě by bylo možné využít některou ze známých struktur rozvětvené regulace. Při zadání úkolu však byl vznesen požadavek aby se nezasahovalo do konstrukce a zlepšení regulace bylo dosaženo pouze softwarovou úpravou regulačního algoritmu.

Pro zjištění dalších potřebných teplot je tedy potřeba využít jiných přístupů. Nebo zvolit takový regulátor, který nebude potřebovat dodatečné informace a bude na tolik robustní aby si poradil s nelinearitami a drobnými změnami v soustavě.

Na základě vytvořeného modelu byl odvozen model jednodušší, který by měl být výpočetně méně náročný aby byl použit v regulaci pro online sledování neznámých parametrů.

Na základě zjištěných kritérií se nabízejí dva přístupy jak daný problém řešit.

### 9.1 Regulátor pracující s modelem soustavy

Tyto regulátory vyžadují podrobnější znalost regulované soustavy, než je měření pouze výstupní veličiny. Neměřené veličiny jsou odvozeny z modelu soustavy. Mimo vlastní regulátor je potřeba vytvořit dostatečně věrný model soustavy, který běží průběžně s regulací a je schopen poskytnout dodatečné informace o chování soustavy.

#### 9.1.1 Regulátor s inverzním přenosem

Linearizace na základě inverzního modelu nelineárního členu. Tento regulátor předpokládá znalost přenosu nelineárního členu. Jako regulátor by byl použit klasický PI regulátor. Akční zásah z regulátoru je zpracován blokem inverzního přenosu a teprve takto upravený akční zásah je vyslán do akčního členu. Výhodou je snadná kompenzace nelinearity. Nevýhodou je potřebná znalost přenosu nelineárního členu. V tomto případě je nelineární člen peltierův článek. Z teorie jsou známi statické i dynamické rovnice,

které popisují přenos článku. Není tedy žádný problém nalézt inverzní přenos. Problém je, že do rovnic vstupují mimo proud, který je znám i teploty na obou stranách článku, které jsou neznámé a není je možné měřit. Teplota teplého konce lze snáze dopočítat z měřené teploty vody a známého tepelného odporu materiálu. Teplota chladné strany je naprosto neznámá a ovlivňuje ji řada faktorů.

Řešením by bylo použít model, ze kterého se potřebné teploty získají. Model však stále bude pracovat s jistou nejistotou, neboť byl nastaven na základě měření za konkrétních známých podmínek. Při změně podmínek, které jsou při měření pouze jedné teploty těžko postřehnutelné může model poskytovat špatné informace.

### **9.1.2 Stavový regulátor se stavovým rekonstruktorem**

Samozřejmě lze použít nelineární teorie regulace a použít stavový regulátor. I zde se však vyskytuje problém, že drtivá většina stavů je neznámých a bylo by nutné použít stavový rekonstruktor s vysokým počtem rekonstruovaných stavů. Výpočetní náročnost rekonstruktoru by překročila možnosti instalovaného mikrokontroleru.

## **9.2 Regulátor se změnou parametrů**

Jiný přístup představuje použití takového regulátoru, který průběžně mění svoje vlastnosti tak aby v každém okamžiku byl zajištěn požadovaný průběh regulované veličiny. Tato cesta nevyžaduje tak přesnou znalost regulované soustavy, samotný PI regulátor je v určitém pracovním rozsahu dostatečně robustní. Komplikaci představuje vhodná volba řídicího zákona. V podstatě lze uvažovat dva přístupy. Použít několik pevně nastavených regulátorů a vhodně mezi nimi přepínat nebo zvolit jeden regulátor s proměnnými parametry.

### **9.2.1 Gain scheduling**

Osvědčená metoda regulace nelineárních soustav lineárním regulátorem. Z měření přechodových charakteristik lze předpokládat, že výrazná je pouze změna zesílení a dominantní časové konstanty jsou málo proměnné.

### **9.2.2 Adaptivní regulátor**

Vzhledem k povaze úlohy, kde většina parametrů je v současném uspořádání neměřitelná, se nabízí možnost použít adaptivní regulátor. Výhodou je, že pro prvotní

nastavení je potřeba jen minimální znalost regulované soustavy. Podíváme-li se na průběh přechodových dějů a velikost časových konstant. Je zřejmé že v těchto průbězích je obsaženo velice málo informací o chování soustavy. Regulační děje jsou velice dlouhé a výstupní signál je málo rozmanitý pro identifikaci.

Další omezující faktor je fakt že v běžném provozu se nachází zařízení po dlouhou dobu v ustáleném stavu bez změn žádané hodnoty.

### 9.2.3 Fuzzy regulace

Pro nastavení regulátoru lze použít i jiných méně konvenčních přístupů jako je například využití fuzzy regulace. Při pokusech se zařízením byla zjištěna řada poznatků, které by bylo možné využít při návrhu fuzzy řízení. Na základě zkušeností se systémem lze navrhnout řadu nastavení regulátorů a vhodně zvolit přepínání mezi nimi právě s využitím fuzzy logiky. Při snaze o nastavení jednoduchého regulátoru bylo zjištěno, že lze velice dobře optimalizovat nastavení regulátoru pro určité rozsahy regulační odchylky. Pokud je však regulátor nastavený pro velké regulační odchylky použit při regulaci malých odchylek dochází k nežádoucím překmitům.

## 9.3 Zvolený regulátor

Předchozí odstavec poskytuje výčet možných řešení problému. Při volbě řešení je potřeba zohlednit řadu omezujících faktorů. Především nedostatečná informace o chování systému daná měřením teploty pouze na jednom místě diskvalifikuje řadu řešení jako velice složitých pro implementaci.

I když velká část práce byla věnována získání věrného modelu systému, průběžný výpočet neznámých parametrů je výpočetně velmi náročný a jednoduší bude použít regulátor s pevně danou strukturou. Nabízela se možnost navázat na předešlou práci na semestrálních projektech zabývajících se adaptivními regulátory, ale dlouhé časové konstanty soustavy a provozování zařízení převážně v ustálených stavech nepředstavují vhodné podmínky pro nasazení adaptivního regulátoru.

Byl zvolen fuzzy regulátor jednak z požadavku zadání, ale také pro jeho vlastnosti. Soustava v sobě nese značnou neurčitost a tak se předpokládá že vhodná volba fuzzy řízení by měla být natolik robustní aby splnila zadaný úkol regulace.

## 10 REGULÁTOR

Pro testování byly zvoleny dva fuzzy regulátory. Fuzzy PI a fuzzy PI+PD. Oba fuzzy regulátory jsou konfrontovány s diskrétním ekvivalentem PI regulátoru, který je v současné době implementován v zařízení. Nastavení regulátorů probíhá s ohledem na několik zadání chování systému. Nejsilnějším požadavkem je nulový překmit při změně žádané hodnoty. Dále je to co nejkratší přechodný děj a invariantnost vůči poruše. Vzhledem k výrazné změně chování soustavy při topení a chlazení je žádoucí aby akční zásah měl během přechodného děje stále stejné znaménko.

### 10.1 Struktura regulátorů

Byly zvoleny klasické fuzzy regulátory. Fuzzy část je pro všechny regulátory nastavena stejně. Nastavení lze popsat následně:

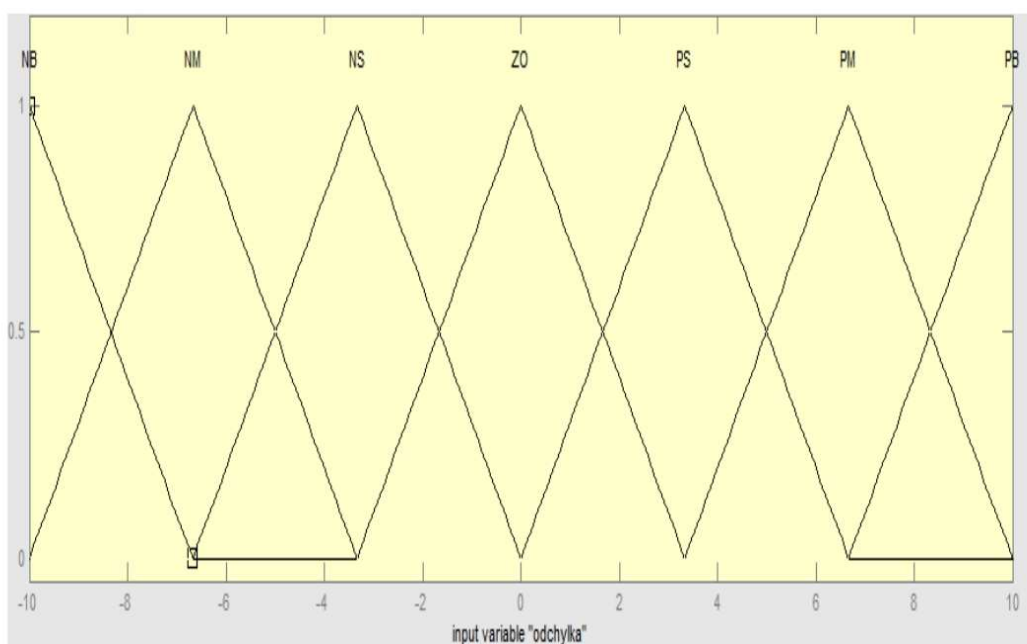
Fuzzifikace probíhá na normalizovaném univerzu  $\langle -10, 10 \rangle$ . Z důvodu volby univerza bylo nutné zvolit měřítko  $M$ , tak aby rozsah vstupních hodnot příslušel zvolenému univerzu.

Bylo zvoleno sedm fuzzy množin pojmenovaných:

NB – negativní velká  
NM – negativní střední  
NS – negativní malá  
ZO – nulová  
PS – pozitivní malá  
PM – pozitivní střední  
PB – pozitivní velká.

Fuzzy množiny mají tvar  $\Lambda$ -funkce.

Vstupem je regulační odchylka  $e(k)$  a difference odchylky  $\Delta e(k)$ .



Obrázek 24: Rozložení funkce příslušnosti pro vstup  $e(k)$  i  $\Delta e(k)$

Báze pravidel je kompletní a obsahuje 49 pravidel. Další optimalizací by šlo počet pravidel zredukovat, ale momentálně se pracuje s kompletní bází. Vztahy mezi antecedenty a konsekventy jsou vyjádřeny v tabulce 10.1.

Tabulka 10.1: Soubor pravidel

|        |                 | $\Delta e(k)$    |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|--------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|        |                 | NB <sub>0</sub>  | NM <sub>1</sub>  | NS <sub>2</sub>  | ZO <sub>3</sub>  | PS <sub>4</sub>  | PM <sub>5</sub>  | PB <sub>6</sub>  |
| $e(k)$ | NB <sub>0</sub> | NB <sub>0</sub>  | NB <sub>1</sub>  | NB <sub>2</sub>  | NB <sub>3</sub>  | NM <sub>4</sub>  | NS <sub>5</sub>  | ZO <sub>6</sub>  |
|        | NM <sub>1</sub> | NB <sub>7</sub>  | NB <sub>8</sub>  | NB <sub>9</sub>  | NM <sub>10</sub> | NS <sub>11</sub> | ZO <sub>12</sub> | PS <sub>13</sub> |
|        | NS <sub>2</sub> | NB <sub>14</sub> | NB <sub>15</sub> | NM <sub>16</sub> | NS <sub>17</sub> | ZO <sub>18</sub> | PS <sub>19</sub> | PM <sub>20</sub> |
|        | ZO <sub>3</sub> | NB <sub>21</sub> | NM <sub>22</sub> | NS <sub>23</sub> | ZO <sub>24</sub> | PS <sub>25</sub> | PM <sub>26</sub> | PB <sub>27</sub> |
|        | PS <sub>4</sub> | NM <sub>28</sub> | NS <sub>29</sub> | ZO <sub>30</sub> | PS <sub>31</sub> | PM <sub>32</sub> | PB <sub>33</sub> | PB <sub>34</sub> |
|        | PM <sub>5</sub> | NS <sub>35</sub> | ZO <sub>36</sub> | PS <sub>37</sub> | PM <sub>38</sub> | PB <sub>39</sub> | PB <sub>40</sub> | PB <sub>41</sub> |
|        | PB <sub>6</sub> | ZO <sub>42</sub> | PS <sub>43</sub> | PM <sub>44</sub> | PB <sub>45</sub> | PB <sub>46</sub> | PB <sub>47</sub> | PB <sub>48</sub> |

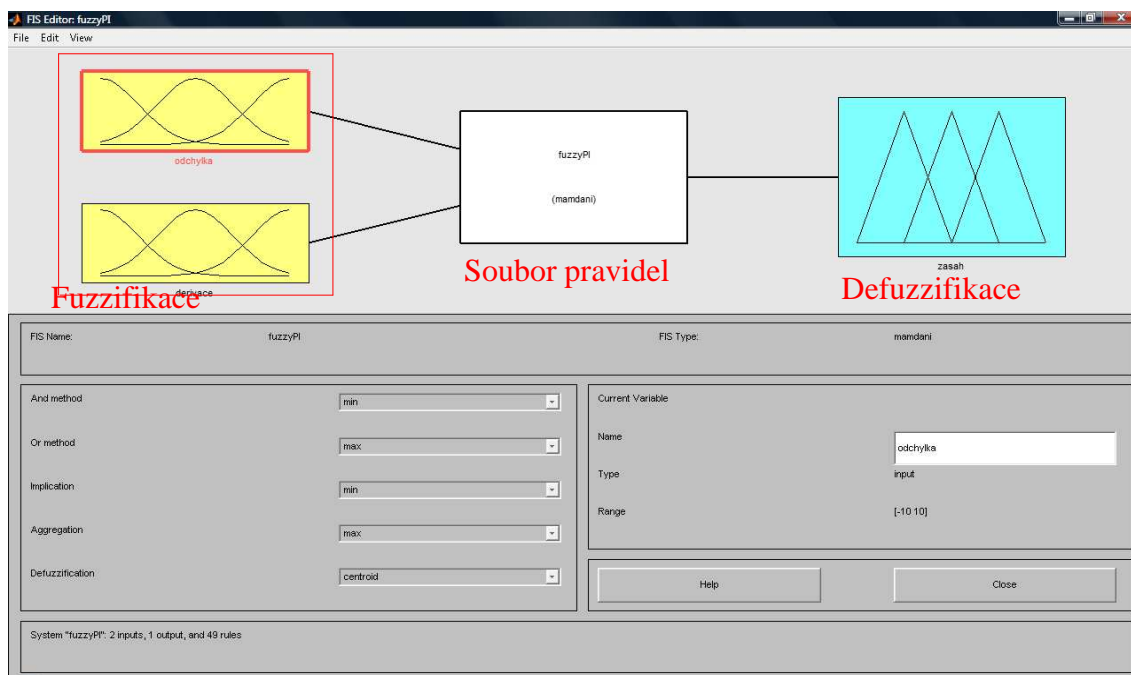


Implikace byla zvolena typu Mamdani. Inferenční mechanismus je kompoziční.

Metoda defuzzifikace je volena „centroid of area“ (metoda těžiště). Defuzzifikovaná výstupní hodnota je upravena zvoleným měřítkem.

Jednotlivé typy fuzzy regulátorů se liší ve zpracování vstupních a výstupních veličin a bude popsána v následujících odstavcích.

K nastavení fuzzy části regulátorů byl použit Fuzzy toolbox prostředí MATLAB-Simulink. Tento toolbox umožňuje nastavit tvar a počet funkcí příslušnosti, volba souboru pravidel a řadu dalších parametrů. Práce v grafickém rozhraní velice usnadňuje ladění fuzzy regulátoru. Výsledkem je soubor \*.fis, který obsahuje nastavené parametry v textové podobě. Tyto soubory jsou potřeba pro práci s fuzzy blokem v Simulinku.



Obrázek 25: Grafické prostředí fuzzy toolboxu pro nastavení fuzzy regulátoru

### 10.1.1 Fuzzy PI

Vychází ze struktury diskrétního PI regulátoru doplněný o fuzzy logiku. Regulátor má dva vstupy: regulační odchylku  $e(k)$  a diferenci regulační odchylky  $\Delta e(k)$  je popsán rovnicí 13.

$$\Delta u(k) = D \{ F \{ K \Delta e(k) + \frac{KT_s}{T_I} e(k) \} \} \quad (13)$$

$F$  – fuzzifikace

$D$  – defuzzifikace

$K$  – zesílení regulátoru

$T_I$  – integrační konstanta

Výstupem je difference akčního zásahu  $\Delta u(k)$ . Akční zásah je počítán podle rovnice:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad . \quad (14)$$

$\Delta$  – difference

$\Delta e(k)$  – difference regulační odchylky

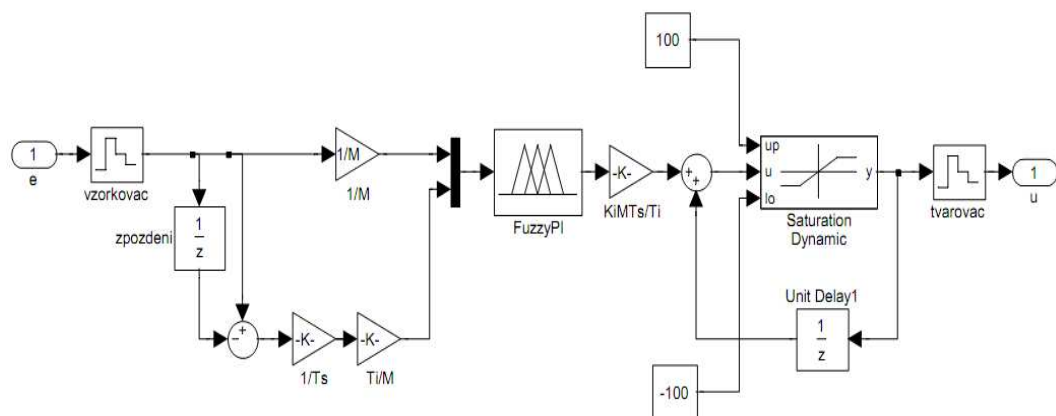
$$\Delta e(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (15)$$

$T_s$  – perioda vzorkování

$e(k)$  - regulační odchylka  $e(k) = w(k) - y(k)$

$u(k)$  – akční zásah

$w(k)$  – žádaná hodnota



Obrázek 26: Struktura fuzzy PI regulátoru

## 10.1.2 Fuzzy PI+PD regulátor

Jako další byl zvolen fuzzy PI+PD regulátor. Tento regulátor využívá dva regulátory fuzzy PI a fuzzy PD. Výstupy obou regulátorů jsou sumovány a dohromady tvoří akční zásah. Fuzzy PI má stejnou strukturu jako regulátor popsáný v kapitole 10.1.1.

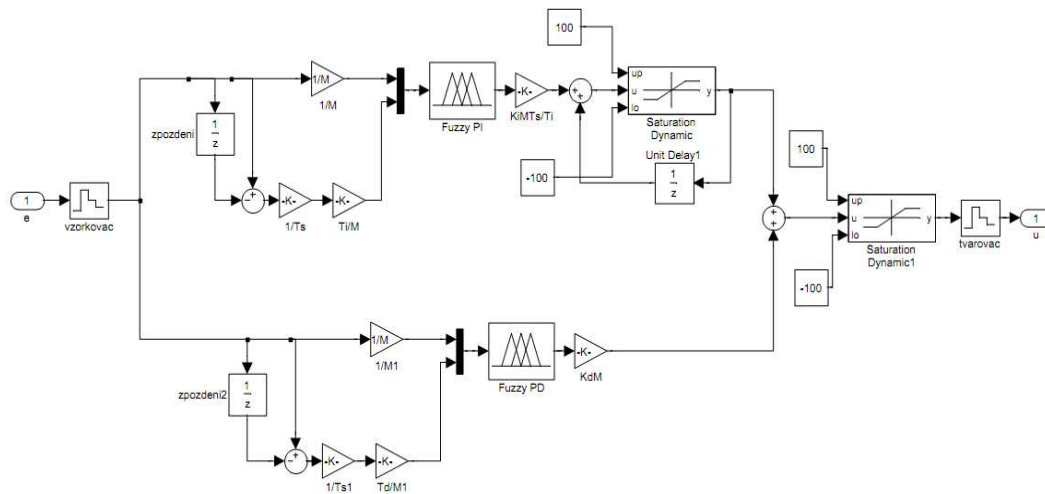
Fuzzy PD regulátor vychází z klasického PD regulátoru. Má dva vstupy regulační odchylky  $e(k)$  a její diferenci  $\Delta e(k)$ . Výstupem je akční zásah  $u(k)$ . Je popsán rovnicí:

$$u(k) = D \{ F \{ K e(k) + \frac{KT_D}{T_s} \Delta e(k) \} \} \quad (16)$$

$K$  – zesílení regulátoru

$T_D$  – derivační konstanta.

Diference regulační odchylky je počítána podle rovnice (15).



Obrázek 27: Struktura fuzzy PI+PD regulátoru

## 10.1.3 Klasický PS regulátor

Ke srovnání odezvy fuzzy regulátorů byl zvolen diskrétní ekvivalent klasického PI regulátoru. Tento regulátor je v současné době použit v řízení bioreactoru.

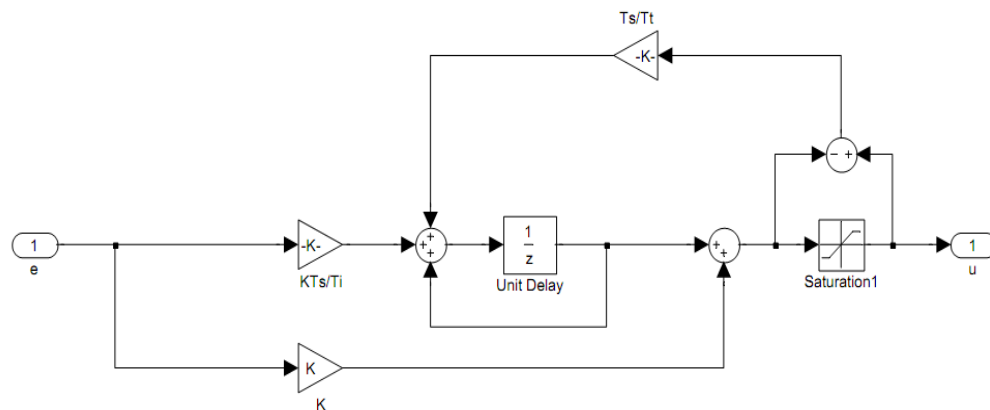
Regulátor lze popsat rovnicí (17)

$$u(z) = K \left( e(z) + \frac{T_s z^{-1}}{T_I (1 - z^{-1})} \right) \quad (17)$$

$K$  – zesílení regulátoru

$T_I$  – integrační časová konstanta

Pro zlepšení chování bylo implementováno dynamické omezení integrační složky.



Obrázek28: Struktura PS regulátoru

## 10.2 Nastavení regulátorů

Nastavení regulátorů bylo voleno s ohledem na splnění požadavků regulace. Nastavení fuzzy mechanismu bylo popsáno v kapitole 12.1. Nastavení konstant regulátorů je shrnuto v tabulce

**Tabulka 10.2: Konstanty regulátorů**

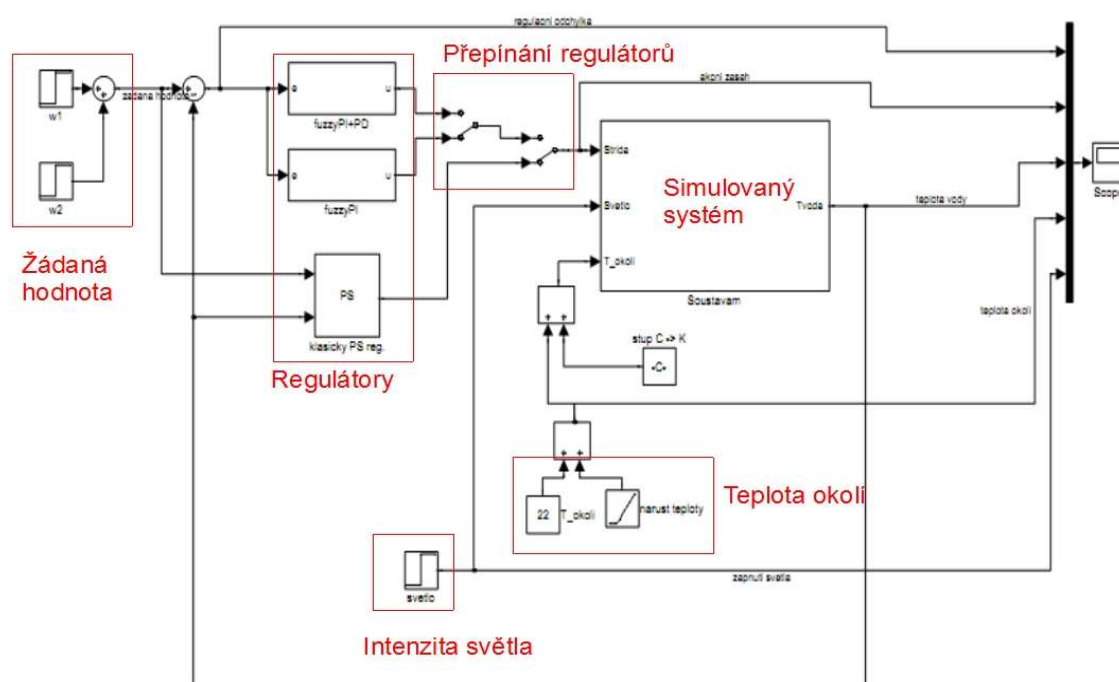
|                                | klasický PS | fuzzy PI | fuzzy PI+PD |
|--------------------------------|-------------|----------|-------------|
| $T_s$ – perioda vzorkování [s] | 0,05        | 1        | 1           |
| $K$ - zesílení                 | 7           | 20       | 5/5*        |
| $T_I$ - integrační konstanta   | 2500        | 600      | 400         |
| $T_D$ – derivační konstanta    | -           | -        | 1           |
| $T_t$ – konstanta sledování    | 1           | -        | -           |
| $M$ - měřítko                  | -           | 10       | 10          |

\*zesílení pro fuzzy PI/PD regulátor

# 11 SIMULAČNÍ SCHÉMA

Na základě získaného modelu soustavy bylo vytvořeno v Simulinku simulační schéma, které obsahuje všechny navrhované regulátory. Umožňuje nastavovat žádanou hodnotu. Obsahuje dvě nejvýznamnější poruchy, které do systému vstupují. Jednoduše lze zadávat velikost poruchy a její průběh. V bloku scope je zaznamenán výstup soustavy (teploty vody) a také velikost akčního zásahu (střída PWM) a průběh poruchy.

Ladění regulátoru na reálné soustavě je vzhledem k časovým konstantám soustavy velice časově náročné a ani vliv poruch nelze zcela exaktně zaznamenat a tak vytvořený simulátor je velice užitečný pomocník pro nastavování regulátorů.



Obrázek 29: Simulační schéma pro testování regulátorů

Model má tyto základní ovládací prvky:

- **Žádaná hodnota**  
umožňuje zadat žádanou hodnotu ve stupních Celsia
- **Přepínání regulátorů**

výběr použitého regulátoru, model neřeší přepínání v průběhu regulace, slouží pouze k výběru jednoho ze tří implementovaných regulátorů

- **Intenzita světla**

simuluje zapnutí osvětlení o intenzitě 0 až 100 % světelného výkonu v definovaném časovém okamžiku

- **Teplota okolí**

zadáva teplotu okolí ve stupních Celsia, lze zvolit lineární změnu teploty se zadanou strmostí v průběhu simulace

Na CD, které je přílohou k této práci je složka matlab/regulace, ve které je simulační schéma pro testování regulátorů s modelem soustavy *system.mdl*. Před spuštěním simulace je potřeba spustit skripty *parametry\_modelu.m*, které definují parametry jednotlivých bloků. Nastavení regulátorů je zadáno ve skriptu *regulatory.m*, který je také potřeba před startem simulace spustit.

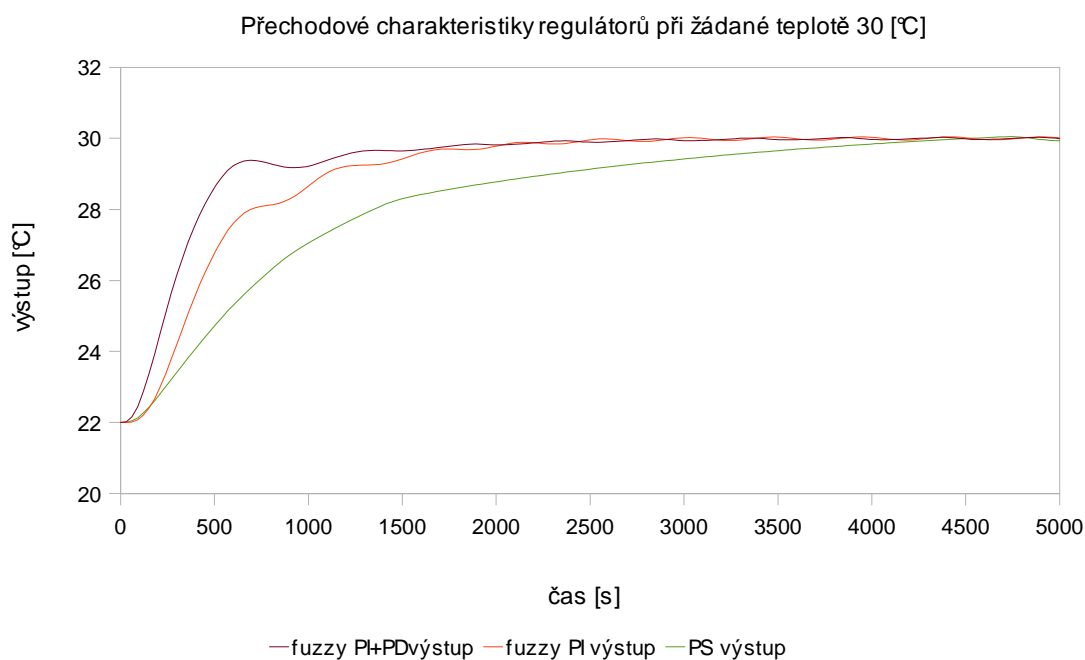
## 12 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Na základě předem definovaných požadavků na regulaci byly nastaveny dva fuzzy regulátory, fuzzy PI a fuzzy PI+PD. Pro srovnání dosažených výsledků slouží diskrétní PS regulátor, tento regulátor je implementován v současném zařízení.

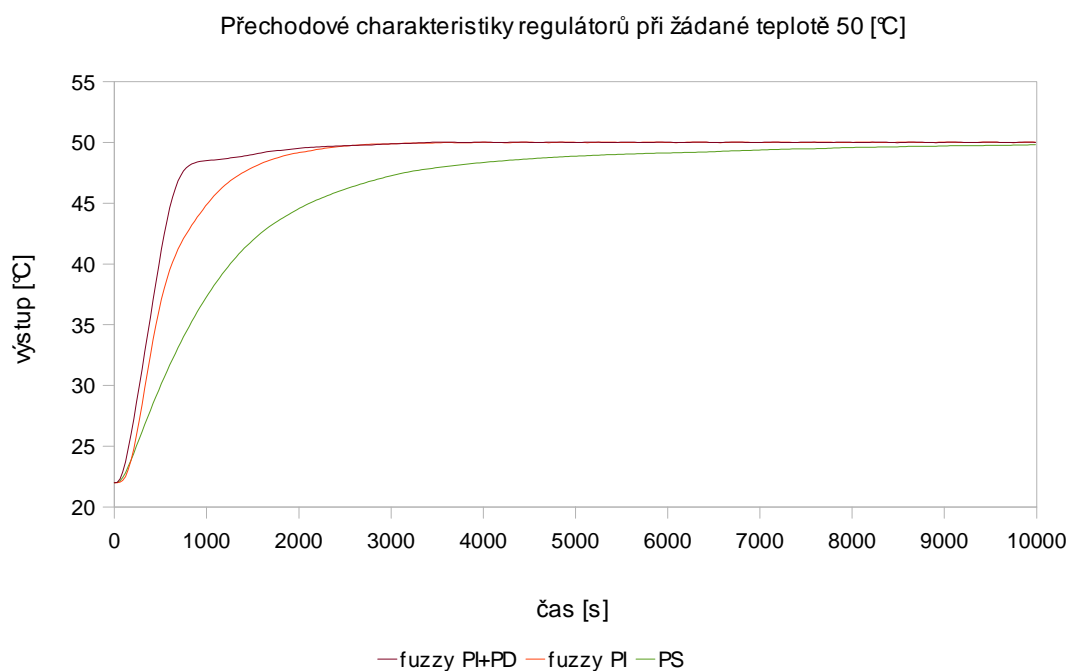
Ověření vlastností probíhalo na třech úrovních rychlost reakce při skoku žádané hodnoty, reakce na poruchu vliv zapnutí světla a změna okolní teploty. Následující tři odstavce shrnují získané výsledky.

### 12.1 Přechodové děje pro různé výkony

Porovnání reakce systému na skok žádané hodnoty. Vzhledem k rozdílnému chování systému v různých pracovních bodech bylo provedeno porovnání regulátorů pro různé žádané hodnoty. V běžném provozu jsou požadované hodnoty kolem 30 a nebo 50 °C.



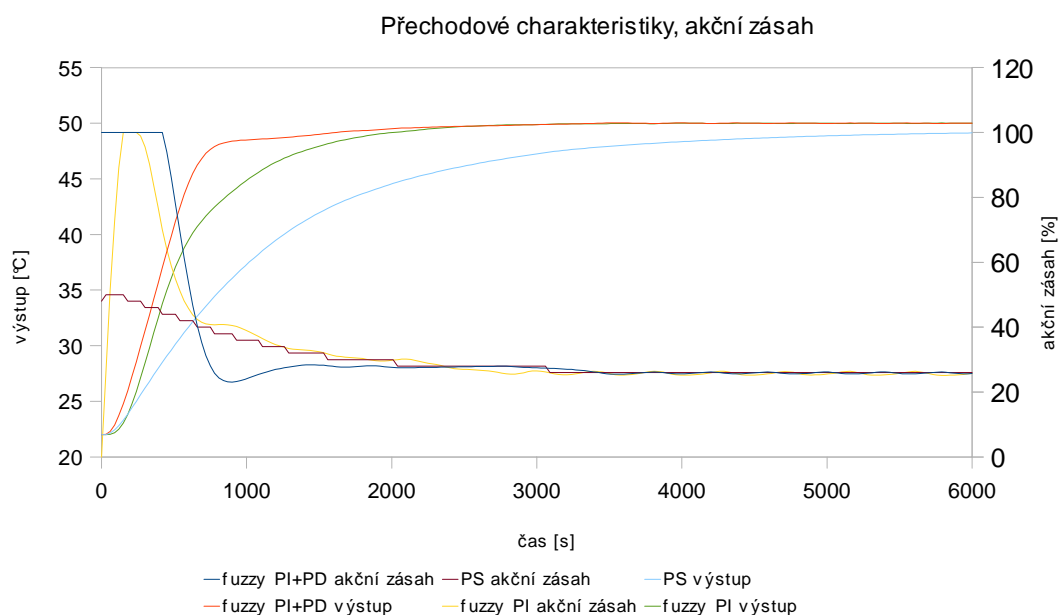
Obrázek 30: Přechodové charakteristiky regulátorů pro žádanou hodnotu 30 °C



*Obrázek 31: Přechodové charakteristiky regulátorů pro žádanou hodnotu 50 °C*

Na zobrazených charakteristikách je vidět že klasický PS regulátor, tak jak je nastavený v bioreactoru má velice přetlumený charakter. Důvodem takového nastavení je požadavek na nulový překmit pro všechny změny žádané hodnoty. Na obou charakteristikách je vidět že fuzzy regulátory mají mnohem rychlejší průběh a stále je splněna základní podmínka regulace bez překmitu. Fuzzy PI+PD regulátor je v tomto porovnání nejrychlejší.



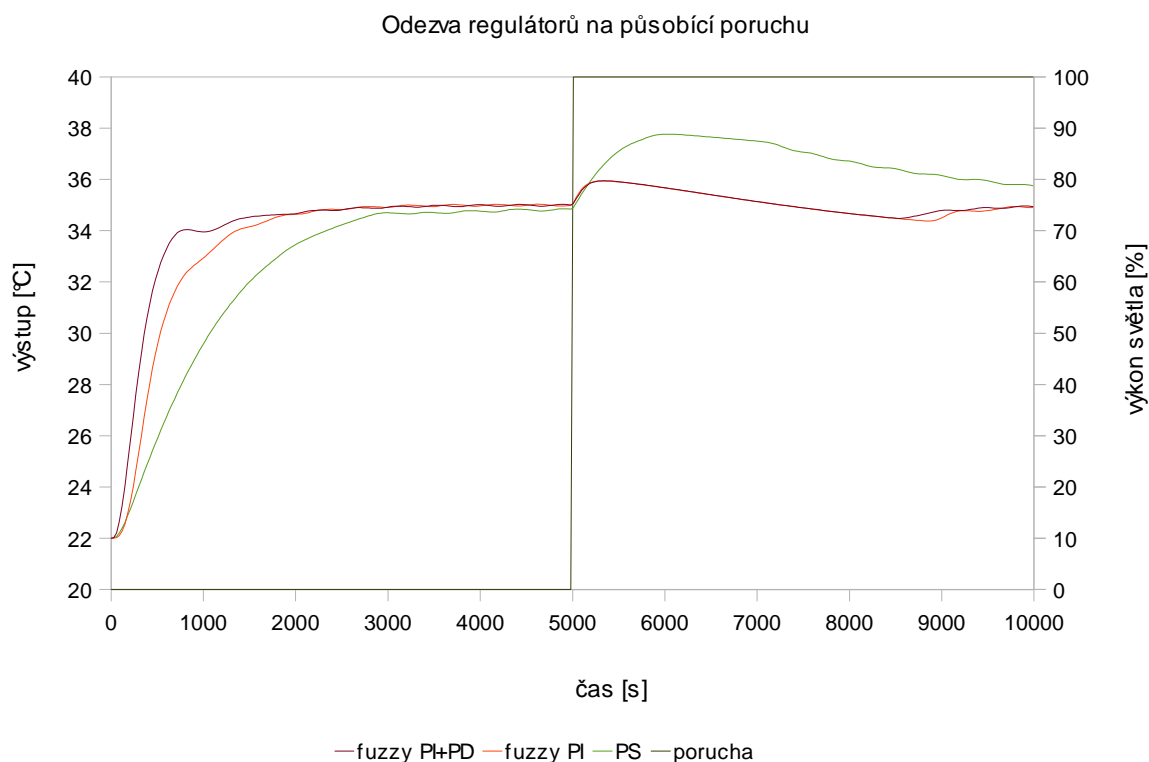


*Obrázek 32: Přechodové charakteristiky a akční zásahy regulátorů při žádané hodnotě teploty 50 °C.*

Fuzzy regulátory mají víc kmitavý akční zásah. Frekvence a amplituda těchto kmitů je však malá a vzhledem k velikosti časových konstant jsou dobře vyfiltrovány a na výstupu se neprojeví.

## 12.2 Odezva na působící poruchu

Mimo co nejrychlejší odezvu na změnu žádané hodnoty byl zadán požadavek na kompenzaci poruchy působící na systém. V systému se vyskytují dvě dominantní poruchy. První je zapnutí světla, které dodává do systému parazitní tepelný výkon. Tato porucha je známa a v dalším textu bude diskutována možnost její kompenzace. Druhou poruchou je teplota okolí. Tato porucha je v současnosti neměřitelná a její průběh většinou nemá skokový charakter, ale jde o pozvolnou lineární změnu.



Obrázek 33: Odezva regulátorů při působení poruchy zapnutí světla na 100 % výkonu při žádané hodnotě 35 °C.

Obrázek 34 ukazuje odezvu systému na poruchu, která začne působit v čase 5000 s. Zapnutí světla na 100 % způsobuje ohřátí vody v bioreactoru, bez regulace, o 10 °C při teplotě okolí 20 °C. I když tato porucha je měřitelná tak v současné době není nijak kompenzována. Na obrázku 33 je vidět že současný PS regulátor není schopen dostatečně reagovat na poruchu. Fuzzy regulátory jsou v tomto ohledu mnohem lepší. Jejich odezva je téměř srovnatelná. Dojde k nárůstu teploty o 1 °C, který je kompenzován. Reakce regulátoru je však velice pomalá a i fuzzy regulátory nejsou schopny dostatečně rychle reagovat. Pro zlepšení odezvy je potřeba tuto měřitelnou poruchu nějakým způsobem kompenzovat.

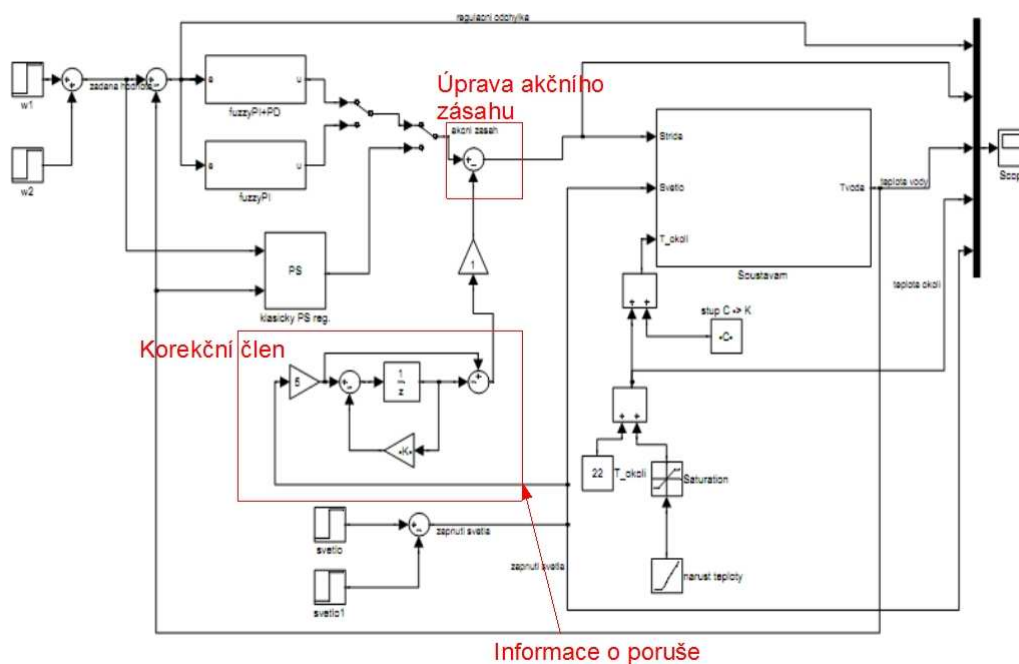
### 12.2.1 Kompenzace poruchy

Je znám okamžik kdy dojde k zapnutí světla a také jeho intenzita. Úpravou regulátoru lze využít tyto informace ke zlepšení reakce na poruchu. Z měření je známa přenosová funkce poruchy: rovnice(18).

$$F_v = \frac{0,115}{2020p+1} \quad (18)$$

Porucha působí v soustavě, což komplikuje návrh korekčního členu. Úprava regulátoru musí být taková aby se nezměnil přenos řízení. Navržené řešení ukazuje, že i jednoduchá kompenzace je schopna velice zkvalitnit regulační děj při poruše. Je znám přenos poruchy na výstup soustavy, přenos akčního členu do místa působení poruchy není úplně exaktně znám a tak nastavení korekčního členu je provedeno spíše na základě zkušeností. Dosažení úplné kompenzace poruchy je předmětem další optimalizace. V současném řešení není použita žádná kompenzace a tak i zde navržené řešení přináší výrazné zlepšení oproti současnému stavu, které je vidět na Obrázku 35 zelená křivka PS regulátoru.

Byl navržen diskretní diferenční člen. Výstup je sumován s akčním zásahem regulátoru podle schématu na Obrázku 34.



Obrázek 34: Implementace korekčního členu pro kompenzaci poruchy v regulačním schématu

Přenos korekčního členu je

$$F_{KR} = K_{KR} \left[ 1 - \frac{z^{-1}}{1 + z^{-1} T_{KR}} \right] . \quad (19)$$

$K_{KR}$  – zesílení korekčního členu

$T_{KR}$  – časová konstanta korekčního členu

Pro použití s PS regulátorem byly zvoleny parametry:

$$K_{KR} = 1,2$$

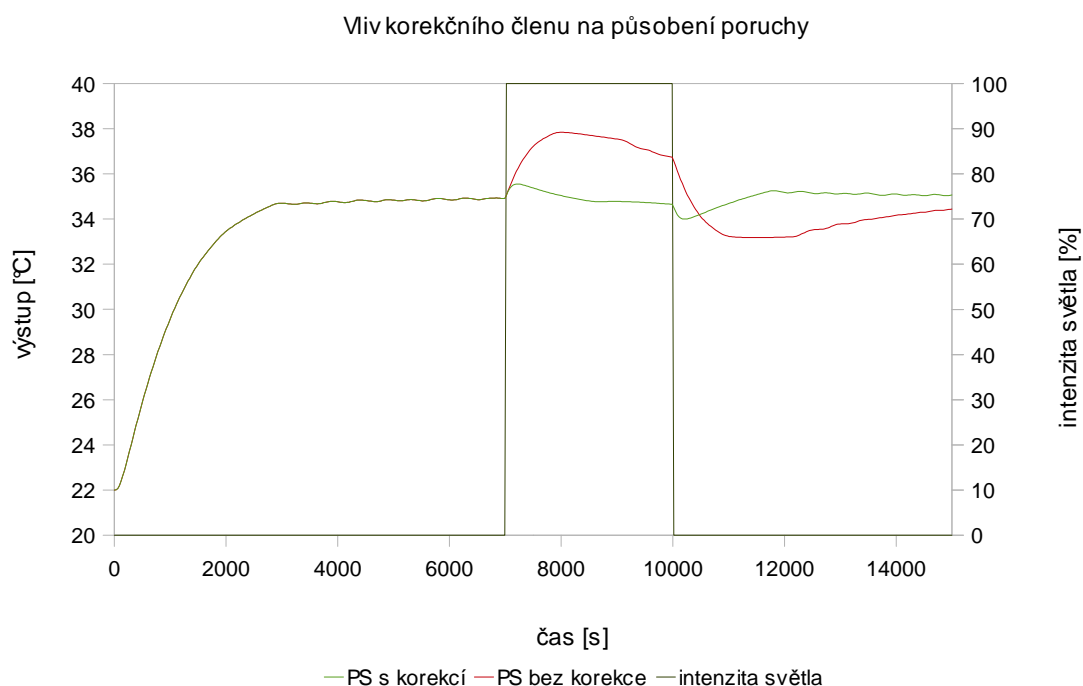
$$T_{KR} = 0,1$$

Pro použití s fuzzy regulátory bylo nastaveno:

$$K_{KR} = 5$$

$$T_{KR} = 0,01$$

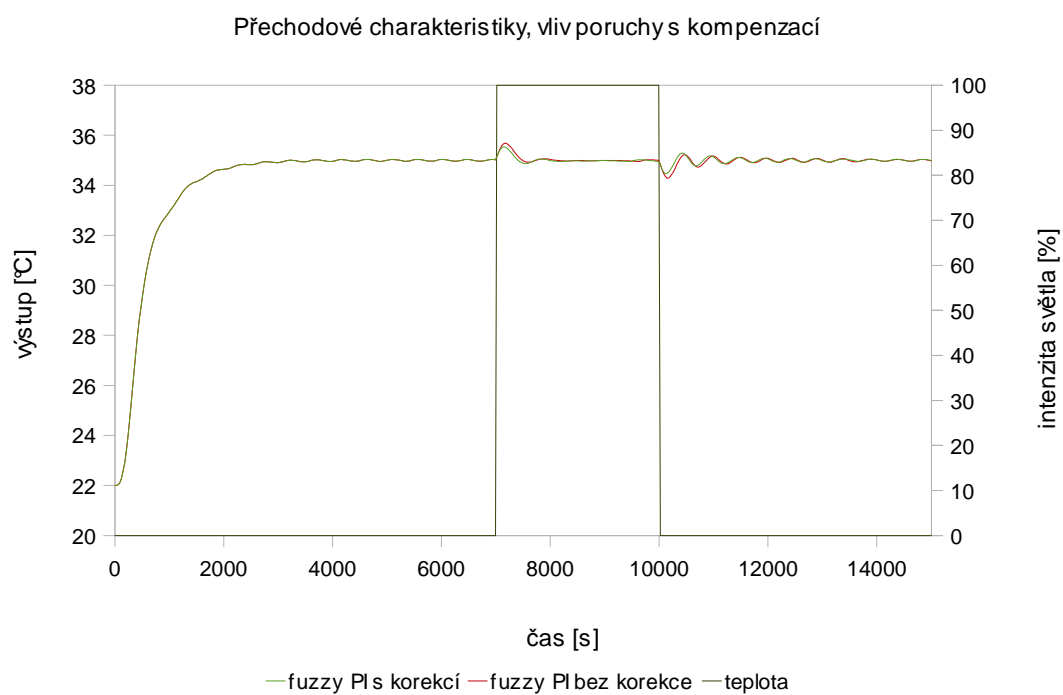
Srovnání chování systému s korekčním členem a bez je zobrazeno na Obrázku 35.



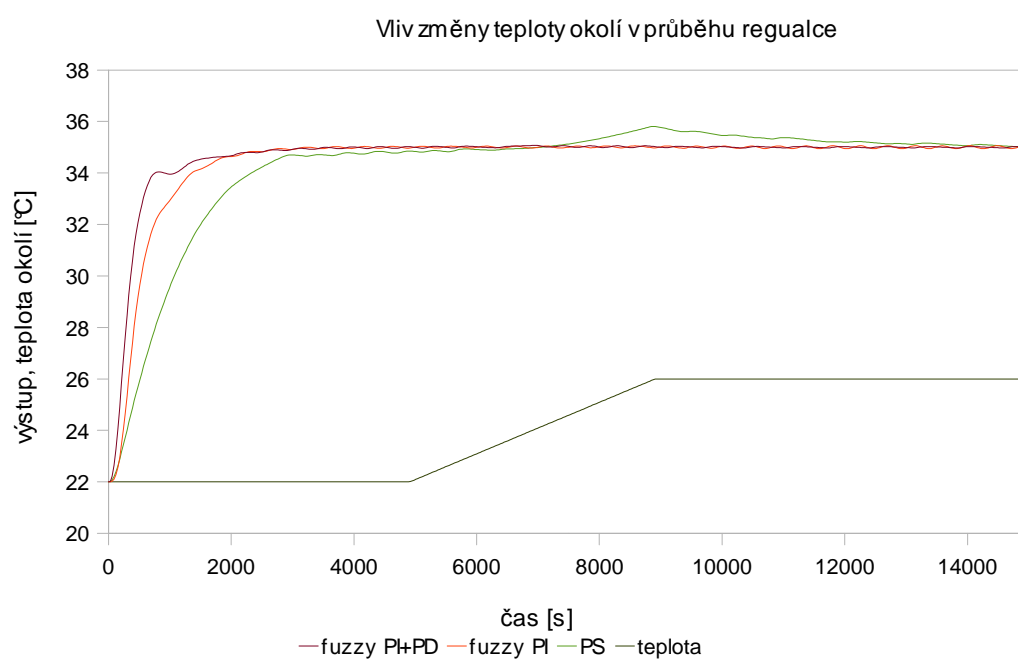
*Obrázek 35: Srovnání odezvy na poruchu s korekčním členem a bez při regulaci PS regulátorem, žádaná hodnota 35 °C.*

V čase 7000 s začne působit porucha, zapnutí světla na 100 % výkonu po dobu 3000 s. Z průběhu je vidět výrazné zlepšení odezvy na poruchu. Odezva na skok žádané hodnoty je stejná a za cenu přidání jedné poměrně výpočetně jednoduché rovnice do regulátoru dojde k rapidnímu zlepšení odezvy systému na poruchu.

Při použití fuzzy regulátorů není vliv korekčního členu tak výrazný, samotný regulátor je schopen velice dobře korigovat působící poruchu. Pro ilustraci zobrazen průběh regulace fuzzy PI s korekčním členem a bez.



Obrázek 36: Vliv korekčního členu s fuzzy PI regulátorem, žádaná teplota 35 °C



Obrázek 37: Vliv změny teploty okolí na průběh regulace, žádaná teplota 35 °C

V čase 5000 s začne lineární nárůst teploty okolí. Reakce regulátorů je zachycena na obrázku 37. PS regulátor je velice pomalý, než je schopen reagovat na působící poruchu dojde k nežádoucímu překmitu. Fuzzy regulátory dovolují mnohem rychlejší nastavení a jsou tak schopny reagovat na poruchu bez viditelného překmitu.

## 12.3 Zhodnocení regulátorů

Ze zobrazených průběhů je vidět, že jednoduchý PI regulátor není schopen splnit všechny požadavky kladené na regulaci. PI regulátor je nastaven tak aby v žádném případě nedošlo k překmitu. Důsledkem je velice přetlumený průběh a velice pomalá reakce na poruchu. Porucha bude vždy vyregulována, ale překmit a doba reakce jsou neúměrně dlouhé.

Naproti tomu oba použité fuzzy regulátory dovolují nastavit ekvivalentní konstanty na mnohem rychlejší průběh. Fuzzy řízení je schopno se lépe vypořádat s nelinearitami soustavy. Výsledkem je zlepšení průběhu regulace ve všech sledovaných parametrech. Je-li porovnáno chování fuzzy PI a fuzzy PI+PD regulátoru, je vidět, dle očekávání, že přidání D složky zrychlí odezvu regulátoru při změně žádané hodnoty. Reakce na poruchu je srovnatelná. Fuzzy regulátory oproti klasickému regulátoru mají víc kmitavý akční zásah. Amplituda a frekvence však není nijak velká a soustava, díky dlouhým časovým konstantám toto kmitání dobře filtruje, takže se na výstupu neprojeví.

V celkovém hodnocení vychází nejlépe použití fuzzy PI+PD následující fuzzy PI a nejhorší odezvu má klasický PS regulátoru. Jediným opodstatněním pro použití klasického regulátoru v této aplikaci je jeho jednoduchost a malé výpočetní nároky. Má-li dojít ke zlepšení chování soustavy je potřeba přistoupit k implementaci jednoho z navrhovaných fuzzy regulátorů. Pro implementaci v jednočipu je potřeba zvážit použití fuzzy PI+PD regulátoru. Je zlepšení chování regulátoru natolik významné aby si vyžádalo složitější regulační strukturu s většími nároky na paměť a výpočetní výkon mikrokontroler?

## 13 IMPLEMENTACE DO JEDNOČIPU

Pro použití fuzzy regulátoru v řídicím mikrokontroler je potřeba přepsat fuzzy blok, v simulinku, realizovaný funkčním blokem do zdrojového kódu v jazyce C. Je potřeba provést tři operace: fuzzifikace, vyhodnocení aktivních pravidel a defuzzifikace.

Program používá funkce:

```
double fuzzy(double e, double de)
```

argumenty funkce jsou *e*(regulační odchylka) a *de*(diference regulační odchylky). Funkce vrací diferenci akčního zásahu. Pro fuzzifikaci je volána funkce:

```
void fuzzifikace(double *FE, double u, double stred)
```

argumentem je pointer na proměnnou, která udává velikost funkce příslušnosti k množině jazykové proměnné, která je právě funkcí testována, náleží-li vstupní hodnota (druhý parametr *u*) množině, vrací *FE* velikost funkce příslušnosti. Nepřísluší-li vrací 0. Poslední parametr je pozice vrcholu právě testované funkce příslušnosti. Funkce pracuje s normalizovaným universem -10,10 a sedmi funkcemi příslušnosti. Je potřeba volat funkci *fuzzifikace* v cyklu pro testování všech funkcí příslušnosti.

Rozvržení vrcholů funkce příslušnosti pro fuzzifikaci i defuzzifikaci je volena stejně:

```
beta[0] = -10;      //NB  
beta[1] = -6.7;     //NM  
beta[2] = -3.3;     //NS  
beta[3] = 0;        //ZO  
beta[4] = 3.3;      //PS  
beta[5] = 6.7;      //PM  
beta[6] = 10;       //PB
```

Fuzzifikace je realizována na trojúhelníkových funkcích příslušnosti a L,  $\Gamma$  funkcích na okrajích universa. Vyobrazení tvaru a rozložení funkcí příslušnosti na Obrázku 25 a v literatuře [7].



- L funkce
 

|                       |   |                                   |     |                            |
|-----------------------|---|-----------------------------------|-----|----------------------------|
| $L(u, \alpha, \beta)$ | = | 1                                 | pro | $u < \beta$                |
|                       |   | $(\alpha - u) / (\alpha - \beta)$ | pro | $\beta \leq u \leq \alpha$ |
|                       |   | 0                                 | pro | $u > \alpha$               |
- $\Lambda$  funkce
 

|                                     |   |                                   |     |                            |
|-------------------------------------|---|-----------------------------------|-----|----------------------------|
| $\Lambda(u, \alpha, \beta, \gamma)$ | = | 0                                 | pro | $u < \beta$                |
|                                     |   | $(u - \alpha) / (\beta - \alpha)$ | pro | $\alpha \leq u \leq \beta$ |
|                                     |   | $(\gamma - u) / (\gamma - \beta)$ | pro | $\beta \leq u \leq \gamma$ |
|                                     |   | 0                                 | pro | $u > \gamma$               |
- $\Gamma$  funkce
 

|                            |   |                                   |     |                            |
|----------------------------|---|-----------------------------------|-----|----------------------------|
| $\Gamma(u, \alpha, \beta)$ | = | 0                                 | pro | $u < \alpha$               |
|                            |   | $(u - \alpha) / (\beta - \alpha)$ | pro | $\alpha \leq u \leq \beta$ |
|                            |   | 1                                 | pro | $u > \beta$                |

$\beta$  – poloha vrcholu funkce

$\alpha, \gamma$  - poloha začátku, konce funkce

*//trjuhelnikova funkce*

*if((alfa <= u) && (u <= stred))*

*\*FP = (u-alfa)/(stred-alfa);*

*if((stred <= u) && (u <= gama))*

*\*FP = ((gama-u)/(gama-stred));*

*//L funkce*

*if((stred < -10) && (u < stred))*

*\*FP = 1;*

*if((stred > 10) && (u > stred))*

*\*FP = 1;*

Následuje úplný soubor pravidel IF-THEN s vyhodnocení typu Mandani. Funkce příslušnosti:

$$\mu_{R_m}(x, y) = \min(\mu_{L_X}(x), \mu_{L_Y}(y)) \quad (20)$$

```

/*0*/ x = 0; y = 0;
if((FE[x] > 0) && (FDE[y] > 0))
{ if(FE[x] < FDE[y]) U[0] = FE[x];
  else U[0] = FDE[y];
}

```

\*výpis jednoho pravidla

Metoda defuzifikace byla zvolena “metoda těžiště COA“ (COG).

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^l u_i \cdot \mu(u_i)}{\sum_{i=1}^l \mu(u_i)} \quad (21)$$

$u^*$  - ostrá hodnota

$u_i$  – diskrétní fuzzy hodnota řídicí veličiny

$\mu$  – velikost funkce příslušnosti

Pro zjednodušení výpočtu je fuzzy hodnota vyjádřena diskrétní hodnotou polohou maxima na univerzu  $u$ . Poloha těžiště je počítána z polohy těchto diskrétních hodnot místo plochy.

```

for(i=0; i<7; i++)
{
    u_cit += (U[i]*beta[i]);
    u_jmen += U[i];
}
u = u_cit/u_jmen;

```

Výše popsaná fuzzy část regulátoru je univerzální a byla tvořena s ohledem na možnost implementace do jiných zařízení. Změnou konstant regulátoru beze změny nastavení fuzzy části, je možné se přiblížit jednoduchosti ladění klasického regulátoru s výhodami fuzzy logiky. Podobné problémy s regulací jsou i v jiných aplikacích a tak je snaha tímto způsobem přiblížit problematiku fuzzy i pracovníkům, kteří až dosud nebyli s tímto problémem seznámeni a nemají čas studovat celou problematiku od základů.

Program je začleněn do programu regulačního mikrokontroleru.

## 14 ZÁVĚR

Zařízení bioreactor slouží ke kultivaci mikroorganismů ve vodním prostředí. Na kvalitu regulace jsou kladeny vysoké nároky. Předně musí být zajištěny tyto tři primární požadavky: nulový překmit při změně žádané hodnoty, invariantnost vůči poruše a minimalizace doby přechodného děje. V současnosti implementovaný PI regulátor není schopen tyto podmínky splnit.

Úkolem této práce je zlepšit kvalitu regulace bez konstrukčních změn na zařízení. Původně implementovaný regulátor byl nastaven velice intuitivně bez hlubší analýzy systému. Řízení teploty obstarává dvojice peltierových článků. Bylo potřeba vytvořit model, který bude věrně popisovat chování systému. Na jehož základě bude možné naladit regulátor. Využití peltierova článku v této aplikaci je poměrně neobvyklé a ani v dostupné literatuře není dostatečně popsáno chování článku v takových podmínkách.

Rozborem fyzikální podstaty systému byl vytvořen model v prostředí MATLAB-Simulink. Tepelná soustava je v podstatě tvořena sériovým spojením setrvačných článků s různou tepelnou kapacitou. Jsou zde dvě dominantní tepelné kapacity nádrží s vodou a chladič. Při vstupně výstupním popisu lze systém modelovat přenosem druhého řádu. Problém představuje nelineární charakteristika výkonu peltierova článku. Výkon článku je závislý na velikosti napájecího proudu a na teplotách teplé a studené strany. Při použití přenosu systému druhého řádu se změnou výkonu mění zesílení a také časové konstanty přenosu. Model soustavy je vytvořen na základě popisu diferenciálními rovnicemi. Dynamika peltierova článku je vzhledem k dynamice soustavy zanedbatelná a tak postačuje popis statickými rovnicemi. Pro exaktní popis aktuálního výkonu by bylo potřeba měřit teploty na obou stranách článku. V bioreactoru je však měřena pouze teplota vody. Výpočet potřebných stavů systému z modelu je výpočetně poměrně náročný a není tedy vhodný pro implementaci do řídicího mikrokontroleru. Na systém působí řada neměřitelných poruch, které by použití průběžného modelu při řízení dále komplikovaly. Bylo třeba hledat takový regulátor, který je dostatečně robustní a potřebuje jen minimum informací o soustavě.

Napájení článku je realizováno pulsně šířkovou modulací. Při vytváření modelu bylo uvažováno zda-li je možné PWM signál nahradit spojitým signálem o stejném výkonu. Bylo prokázáno že to nelze. Peltierův článek má diametrálně odlišnou charakteristiku při napájení PWM a při aplikaci stejnosměrného signálu. Vliv periody PWM na nízkých frekvencích do 200 Hz nebyl prokázán. Vzhledem k časovým konstantám soustavy není problém s frekvencemi spínání v řádu jednotek Hertz. Vyšší frekvence naopak zhoršují vlastnosti článku.

S ohledem na zjištěné poznatky při identifikaci soustavy bylo diskutováno několik možných řešení regulace. Většina by však vyžadovala dodatečné informace o chování soustavy z měření teploty na více místech a to v současnosti není možné.

Informace z měření systému jsou velice vágní a pozorováním systému lze odvodit řadu pravidel pro řízení. Tyto pojmy vystihují podstatu fuzzy logiky. Pro řešení problému byly tedy zvoleny dva typy fuzzy regulátorů: fuzzy PI a fuzzy PI+PD. Výhodou je, že oba regulátory pracují pouze s regulační odchylkou a její diferencí. K porovnání chování obou regulátorů slouží klasický PI regulátor, který je v současnosti implementován v zařízení.

Pro ladění regulátoru byl použit vytvořený model soustavy. Jelikož časové konstanty soustavy jsou okolo 2000 s je ladění reálného systému časově náročné. Použití modelu velice zkrátilo čas potřebný pro nastavení regulátoru a další výhodou je možnost přesně definovat poruchy, které do systému vstupují.

Původní nastavení PI regulátoru je velice tlumené tak aby nedošlo k překmitu. Dlouhá integrační konstanta velice prodlužuje regulační děj a nedovoluje regulátoru adekvátně reagovat na poruchy v soustavě. Naproti tomu oba fuzzy regulátory jsou schopny lépe si poradit s nelinearitami soustavy a umožňují naladění s mnohem rychlejším průběhem. Výsledkem je rychlejší regulační děj bez překmitu a také reakce na poruchu je výrazně lepší. Ze srovnání nejlépe vychází fuzzy PI+PD regulátor, díky přítomnosti D složky má nejrychlejší průběh. Cenou je však dvojnásobná výpočetní náročnost.

Do systému vstupují dvě dominantní poruchy. Zapnutí světla dodá do soustavy parazitní tepelný výkon úměrný intenzitě světla. Tato porucha je skoková a je měřitelná. Druhou poruchou je teplota okolí. Je neměřitelná a má většinou pozvolný průběh. Měřitelnou poruchu lze kompenzovat, v zařízení však žádná kompenzace není. V práci je ukázáno že i výpočetně jednoduchá kompenzace má podstatný význam na zkvalitnění odezvy na poruchu.

Pro snazší implementaci byl zvolen fuzzy PI regulátor, který je implementován do řídicího jednočipu. Jednočip pracuje v pevné řádové čárce. Hledá se stále taková implementace, aby co nejméně zatěžovala procesor. Je potřeba nalézt kompromis mezi kvalitou regulace a výpočetní náročností.

Dlouhodobější testování ukáže, zda-li je možné minimalizovat soubor pravidel. Dále se hledá optimální rozložení funkcí příslušnosti aby se naplno využilo všech výhod regulátoru. Bylo ukázáno že využití fuzzy logiky v řízení teploty bioreactoru vede k podstatnému zlepšení kvality regulace ve všech sledovaných parametrech. Díky velkému množství kombinací nastavení je však hledání optimálního nastavení ještě otázkou dlouhého vývoje. Získané zkušenosti zpřístupnili tuto problematiku. Je však potřeba získat ještě mnoho dalších zkušeností z praxe k úplnému pochopení a využití všech výhod, které tato stále ještě poměrně nekonvenční metoda nabízí.

Při vytváření modelu systému byla získána řada poznatků z oblasti tepelných soustav. Bylo popsáno chování peltierova článku v oblasti kde jeho využití není úplně běžné. Výsledky práce budou použity i v jiných aplikacích kde se vyskytují podobné problémy. Vytvořený fuzzy regulátor umožní zpřístupnit tuto problematiku i dalším pracovníkům firmy. Program pro fuzzy regulátor v jazyce C byl psán tak aby byl maximálně univerzální a dal se rychle použít i v jiných aplikacích. Prvotní hledání

optimálního nastavení je tak možné pouhou změnou zesílení a integrační konstanty což se velice blíží ladění klasického regulátoru.

## Literatura

- [1] NAGY, M., ROMAN J.: *The Effect of Puls Width Modulation (PWM) Frequency on the Reliability of Thermoelectric Modules*. TE Technology, Inc. Traverse City, Michigan, USA
- [2] *Technical Manual, Thermoelectric cooling*. RMT Ltd. Moscow
- [3] HUANG, B.J., DUANG C.L.: *System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler*. International Journal of Refrigeration 23 (2000) 197-207
- [4] ROTH, P., CANCINO, B., ALVARADO, A. A.: *SIMULATION AND TEST OF PELTIER ELEMENTS IN CONNECTION WITH PHOTOVOLTAICS CELLS*. Department of Mechanical Engineering, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- [5] NOSKIEVIČ, P.: *Modelování a identifikace systémů*. MONTANEX a.s., Ostrava, 1999, ISBN 80-7225-030-2.
- [6] Pololu Robotics & Electronics. *VNH2SP30 + Peltier: nonlinear current at high PWM frequency?*[online]. [cit 2011-02-02].  
<<http://forum.pololu.com/viewtopic.php?f=15&p=9428>>
- [7] JURA, P.: *Základy fuzzy logiky pro řízení a modelování*, PC – DIR spol. s. r. o. - Nakladatelství, Brno
- [8] PIVOŇKA, P.: *Optimalizace regulátorů*, elektronická skripta, Brno 2005
- [9] VELEBA, V.: *Číslicová řídicí technika – Počítačová cvičení*, Brno 2005
- [10] HRABEC, J.: *Fuzzy logic toolbox pro matlab*, elektronický text. VUT Brno
- [11] POKORNÝ, M.: *UMĚLÁ INTELIGENCE V MODELOVÁNÍ A ŘÍZENÍ*, BEN Praha 1996, ISBN 80-901984-4-9
- [12] BLATĚ, J.: *Automatické Řízení*, BEN – technická literatura, Praha 2004, ISBN 80-7300-148-9
- [13] HEROUT, P.: *Učebnice jazyka C – 1. díl*, Kopp 2008, ISBN: 80-7232-351-7
- [14] BLAHA, P., VAVŘIN, P.: *Řízení a regulace I*. Elektronické skriptum VUT v Brně
- [15] PIVOŇKA, P.: *Číslicová řídicí technika*, Elektronické skriptum VUT v Brně, Brno 2003
- [16] KMÍNEK, M., FINKEOVÁ, J., NACHTIGALOVÁ, I., PALATOVÁ, M., MELZOCH, K.: *Simulace řízení bioreaktoru za využití fuzzy regulátoru*, Automatizace, Ročník 48, Číslo 3, Březen 2005

- [17] ZHAOXIA, L.: *A Simple Method To Estimate The Physical Characteristics Of A Thermoelectric Cooler From Vendor Datasheets*, Electronics Cooling, srpen 2008, <http://www.electronics-cooling.com/>
- [18] WAVELENGTH ELECTRONICS, OMPTIMIZING THERMOELECTRIC TEMPERATURE CONTROL SYSTEM, říjen 2005
- [19] LAU, P., BUIST, R.: *TEMPERATURE AND TIME DEPENDENT FINITE-ELEMENT MODEL OF A THERMOELECTRIC COUPLE*, TE Technology, Inc. Michigan USA
- [20] GALAN, P.: *Temperature control based on traditional PID versus fuzzy controllers*, Control Software Designer, Nortel Networks
- [21] *CP1H/CP1L CPU Unit PROGRAMING MANUAL*. Omron, rev. Květen 2007
- [21] *CP1L CPU Unit OPERATION MANUAL*. Omron, Březen 2009
- [21] *Communication Commands REFERENCE MANUAL*. Omron, Červenec 2009

# SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. CD

Příloha 2. Popis souborů vytvořených na CD

Příloha 3. Zobrazení některých bloků ze simulinku

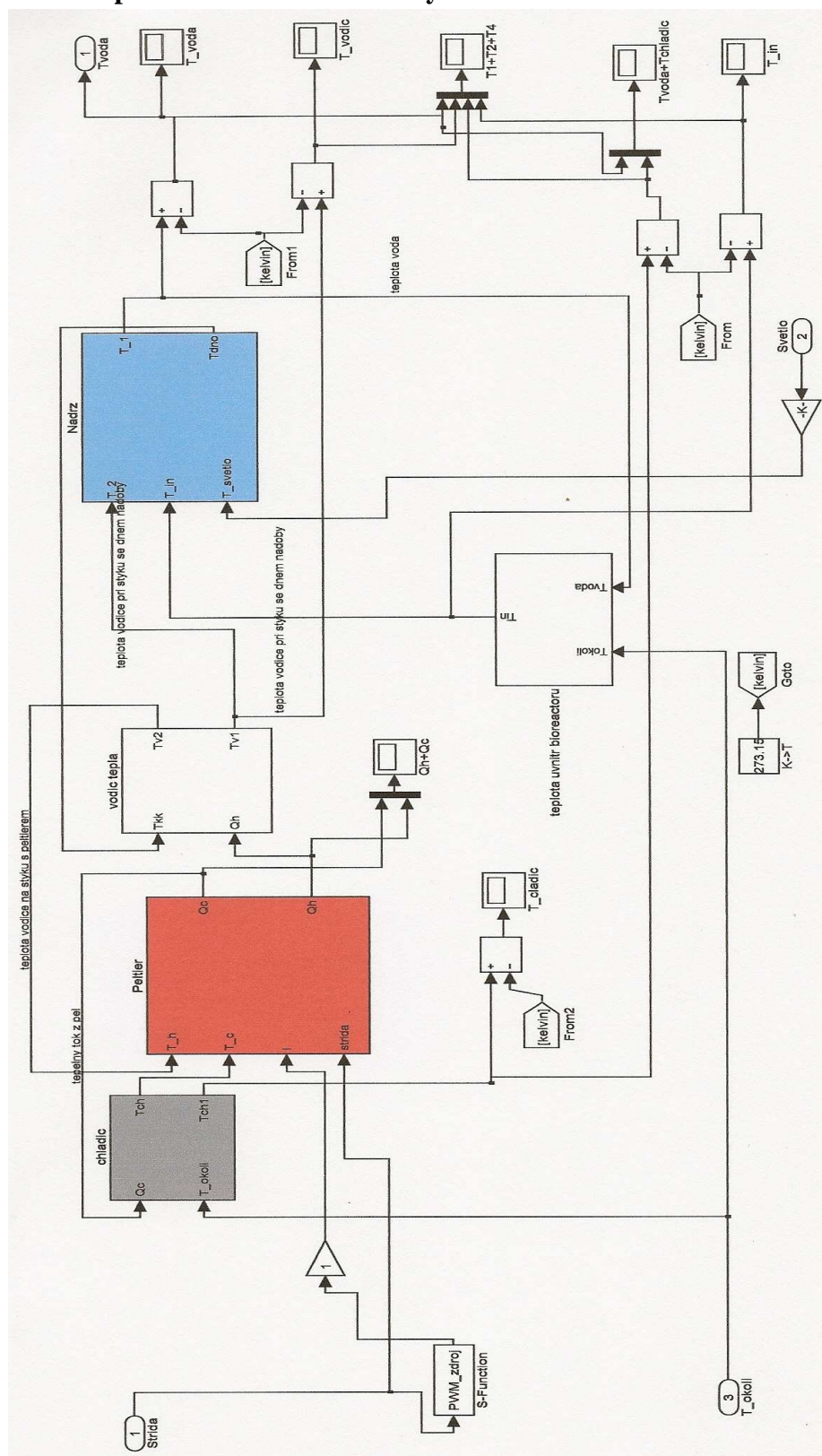


## Příloha 2.

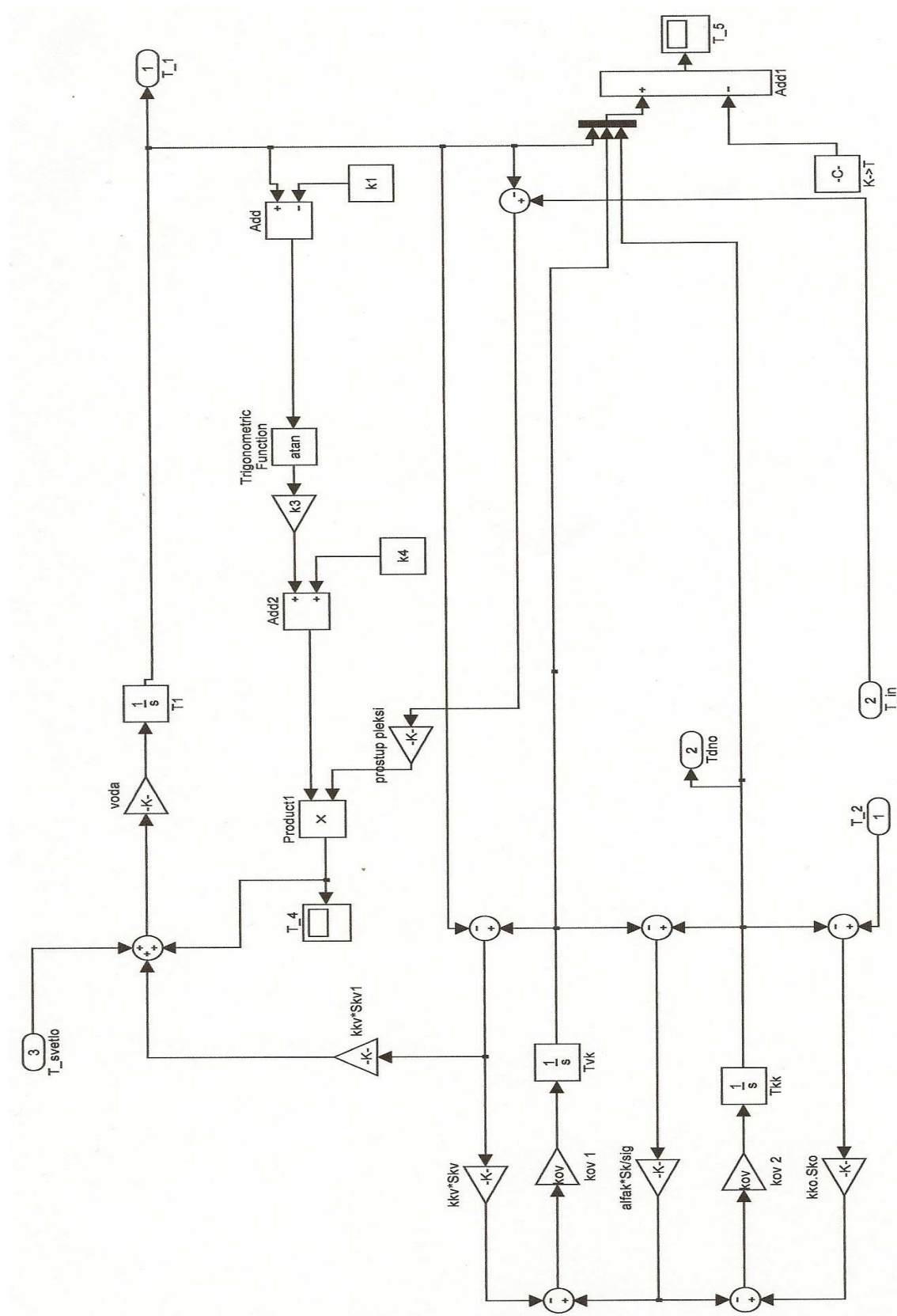
Přílohou této práce je CD nosič obsahuje:

- elektronickou verzi diplomové práce
- složku *matlab* obsahuje všechny vytvořené programy pro MATLAB-Simulink
  - podsložky: *měření* – skripty pro sběr dat  
*modelovani* – schémata v simulinku pro modelování a skripty s parametry. Před spuštěním simulace je potřeba spustit skript s parametry  
*regulace* – obsahuje schémata v simulinku, skripty a programy v jazyce C pro regulaci včetně výstupů z fuzzy toolboxu  
*data* – soubor změřených dat z identifikace systému
- složku *PLC* obsahuje program v prostředí CX-programmer pro PLC automat OMRON
  - podsložku: *FINS* – obsahuje program pro komunikaci s PLC po Ethernetu psaný v prostředí MS Visual Studio
- složka *Keil* obsahuje implementovaný fuzzyPI regulátor psaný v jazyce C v prostředí Keil  $\mu$ Vision3
- *Photobioreactor\_manual\_2010-06.pdf* manual k photobioreactoru

### Příloha 3.1 Kompletní simulační schéma systému



## Příloha 3.2 Model nádrže



### Příloha 3.3 Model chladiče

